PARTS OF THE ORIGINAL DOCUMENT

ARE OF POOR REPRODUCTIVE QUALITY

CERTAINES PARTIES DU DOCUMENT ORIGINAL

SONT DE PIÈTRE QUALITÉ DE REPRODUCTION

Conseil national de recherches Canada
Institut de génie des matériaux
Boucherville (Québec)

National Research Council Canada
Industrial Materials Research Institute
Boucherville, Quebec

PDP 87

IGM87D-000-595-G
CNRC 27870

PDP-'87

LES PLASTIQUES

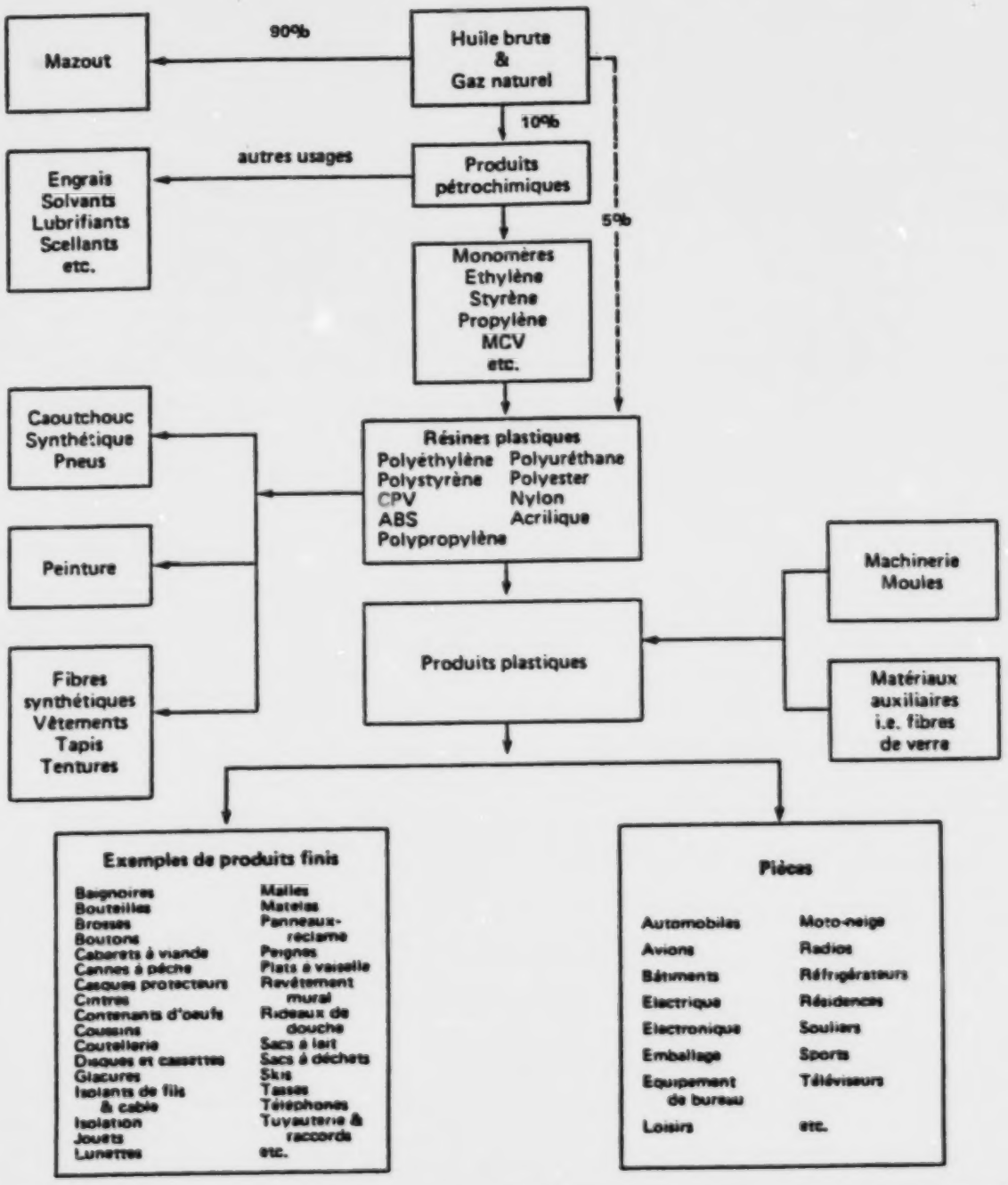
STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

APPLICATIONS

B. FAVIS
P. VANGHELUWE

TABLEAU 1
L'Industrie du Plastique



LES POLYOLEFINES (PE, PP)
LES POLYETHYLENES (PE), LES POLYPROPYLENES (PP)

GENERALITES

On appelle POLYOLEFINE les polymères dérivés de la polymérisation de l'éthylène dans lesquels on peut substituer des hydrogènes par une groupement hydrocarboné différent.

L'éthylène de formule chimique $CH_2 = CH_2$ donnera le polyéthylène, le polypropylène, etc. (voir fig. 1), par simple substitution du groupe latéral (H, CH_3, C_2H_5, C_4H_9, ...).

1. PREPARATION

1.1 Les polyéthylènes sont issus de la polymérisation de l'éthylène gazeux et seront de nature différente suivant les modes de polymérisation.

. Le procédé "HAUTE PRESSION" est historiquement le plus ancien (1933).

Ce procédé en masse ou en émulsion nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de 1000 bars. Ces procédés conduisent à un polyéthylène comportant des ramifications et donc difficilement cristallisable. On le nommera POLYETHYLENE BASSE DENSITE (PEbd) [fig. 2].

. Les procédés "BASSE PRESSION" (ex: ZIEGLER-NATTA).

Ces procédés sont basés sur l'utilisation de catalyseurs et nécessitent des pressions faibles < 50 bars.

Ces procédés permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires plus facilement cristallisables. Le polyéthylène plus cristallin que le PEbd, donc plus dense est appelé POLYETHYLENE HAUTE DENSITE (PEhd) [fig. 2].

Depuis quelques années, on rencontre un polyéthylène à haut poids moléculaire (2 500 000) appelé POLYETHYLENE UHMW (ultra high molecular weight). Ce PE uhmw prend place dans la gamme des densités moyennes à hautes (d > 0,935).

1.2 Les polypropylènes sont polymérisés en présence de catalyseurs suivant le procédé ZIEGLER-NATTA comme le PEhd.

1.3 **Les copolymères propylène-éthylène** souvent appelés polypropylène-copolymères ont des propriétés aux chocs améliorées (copolymères séquencés). Les copolymères statistiques sont particulièrement adaptés aux fabrications de films, corps creux, plaques ...

2. PROPRIETES PHYSIQUES

. Le mode de polymérisation des polyéthylènes conduit à des taux de cristallisations plus ou moins faibles. Ils seront d'autant plus difficile à cristalliser que le polymère est ramifié , ces ramifications gênant l'arrangement macromoléculaire. Les densités des PE iront de 0,910 à 0,960.

. L'aspect des polyoléfines est blanc laiteux et de toucher cireux. Les polyoléfines sont **opaques** en forte épaisseur à **transparents** en films.

Les polyéthylènes sont en général assez perméables aux hydrocarbures , essences ...

. L'imperméabilité décroît comme le taux de cristallisation augmente puisque le volume libre intermacromolécules décroît, limitant ainsi la pénétration du diffusant.

3. PROPRIETES MECANIQUES

A 23°C ces matériaux partiellement cristallins sont au-dessus de leur température de transition vitreuse. Donc leur phase amorphe sera caoutchoutique et ceci sera sensible au niveau des propriétés mécaniques.

Plus le polymère est cristallin et plus la phase amorphe est réduite et donc cette influence précédemment décrite sera d'autant diminuée.

. Le PEbd est à température ambiante plus sensible au fluage que le PEhd et le PP (plus cristallins).

. Le PEbd est souple à température ambiante permettant la réalisation de gaine, fil, tuyau souple, emballage ...

. Le PEhd a un module plus élevé que le PEbd (voisin de celui du polypropylène) mais un allongement à la rupture (A %) plus faible.

. Les propriétés mécaniques sont très nettement affectées par le poids moléculaire, la figure 2 reproduit un exemple pour le polyéthylène.

. Les **polyoléfines sont très sensibles à l'orientation** c'est-à-dire que les propriétés mécaniques sont améliorées si les macromolécules ont été orientées dans le sens de l'effort.

- soit dès la mise en oeuvre par extrusion, par exemple. Cette orientation des macromolécules à l'état fondu peut alors conduire aussi à une augmentation de la cristallinité. Cette orientation peut être prévue à l'injection en choisissant le point d'injection donc le mode d'alimentaiton et d'écoulement dans le moule.
- soit par étirage mécanique de fils ou bandelettes afin de les rendre plus résistantes. La figure 3 montre que pour un essai de traction d'un polyoléfine, la contrainte de rupture est supérieure à la contrainte d'étirage σ_{sb}.

On peut aussi réaliser l'étirage de films dans deux directions (bi-axial). Il s'agit là d'une orientation de macromolécules pelotonnées dans la phase amorphe (fig. 4).

Propriétés au choc

. Pour ces polymères cristallins, il faudra éviter les entailles préjudiciables à la résistance au choc. Il faudra prévoir des **congés de 0,2 à 0,5 mm** au fond des **rainures.**

Les polyéthylènes refroidis rapidement (trempe) moins cristallins seront **moins sensibles au choc.**

. **Le copolymère polypropylène-éthylène a de meilleures propriétés au choc** que l'homopolymère, les chaînes de polyéthylène lui conférant une certaine capacité d'amortissement.

Propriétés au frottement

La nature paraffinique du polyéthylène (surtout le PEhd), en fait un matériau avec de bonnes propriétés de frottement (surtout sous forme injectée).

Les coefficients de frottement dynamiques pour une vitesse donnée sont indépendants de la pression de surface μ = 0,15 à 0,25 , pression admissible $\leqslant$ 10 N/mm^2, vitesse $\leqslant$ 2 m/s .

. Le PP a de moins bonnes propriétés au frottement μ = 0,25 à 0,45.

Propriétés en fatigue (flexion répétée)

Le PP a d'excellentes propriétés en flexion répétée d'où son utilisation pour la réalisation de charnières intégrées à la pièce injectée (fig. 5).

4. PROPRIETES CHIMIQUES

Les polyoléfines possèdent une très bonne stabilité chimique. A des températures inférieures à 60°C, ils sont pratiquement insolubles.

. Ils ne sont attaqués ni par les acides (sauf oxydants) ni les bases, ni les solutions de sels (d'où leur utilisation en vaisselle de chimie).

. Ils sont insolubles dans l'eau même sous forme de films (emballage).

. Ils sont reconnus utilisables pour des applications alimentaires (bouteilles de lait).

. Les polyéthylènes sont sensibles à la fissuration sous contraintes en présence de savon, alcools, détergents ... Notons qu'un PE refroidi lentement et donc plus cristallin est moins perméable aux solvants.

. Les polyoléfines sont à l'état naturel très sensibles à l'action des rayons ultra-violets (U.V.) en présence d'oxygène (air) et pour palier à cet inconvénient, on les charge souvent de 2 à 3 % de poudre de carbone (carbon black), le colorant inévitablement en noir.

5. PROPRIETES ELECTRIQUES

Les polyoléfines sont d'excellents isolants électriques pour des conditions variées d'ambiance.

. Ils ont une faible résistivité et une rigidité diélectrique élevée.

. Le faible facteur de pertes diélectriques (tan δ) qui représente l'énergie perdue, transformée en chaleur dans le diélectrique interdira le soudage haute fréquence.

. Le Pe sera utilisé comme isolant de câbles, fils ...

6. PROPRIETES THERMIQUES

. Le PE et le PP brûlent même en l'absence de la flamme initiatrice avec une flamme bleutée et ils "gouttent".

. En l'absence de contrainte, le PEhd et le PP peuvent supporter une température de 110 à 120°C (stérilisation par exemple). Mais cette température:

- décroît avec la charge $\leq$ 100°C,
- augmente avec le taux de réticulation < 130°C.

. Le passage de la tempéature de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polymère est plus cristallin comme le PEhd et le PP.

7. PROPRIETES DIMENSIONNELLES

. La stabilité dimensionnelle est indépendante de la reprise d'humidité (faible < 0,2%).

. Ces polymères hautement cristallins auront donc un retrait important dont il faudra tenir compte au moulage.

8. CHARGES, RENFORTS, ADDITIFS

. Pour une stabilisation de polyoléfines en présence d'ultra-violets (rayons solaires), on les charge de poudre de carbone (carbon black) ou de stabilisants lumière.

Exemple: film agricole, tuyaux d'extérieurs ...

. On trouve aussi des PP chargés talc ou mica 20 à 40% qui, de propriétés mécaniques sensiblement voisines de celles du PP seul, reviennent moins cher.

. On rencontre le PP chargé de fibres de verre jusqu'à 30% avec des meilleures propriétés mécaniques.

9. MARQUAGE, IMPRESSION

D'une façon générale, les polyoléfines présentent une surface sur laquelle il est difficile d'adhérer. Cependant chaque producteur propose des solutions et des préparations de surface pour une impression, une peinture, un marquage voire une métallisation sous vide.

10. MISE EN OEUVRE, CONCEPTION DES PIECES

Les polyéthylènes se mettent facilement en oeuvre par les techniques de mise en oeuvre classique. Seul le PE "UHMW" présente des difficultés et sera pratiquement moulé par compression.

10.1 Extrusion

10.1.1 Extrusion de profilé (plaques, joncs, tubes, fils)

. L'indice de fluidité à chaud doit être < 2 .

. La fabrication de tube de $\phi_{ext} \leq 6$ mm ne nécessite pas de calibration.

. Pour les tubes jusqu'à $\phi_{ext} \approx 100$ mm on utilise un conformateur à vide.

. Pour des tubes de diamètres plus importants, on calibre par surpression à l'intérieur de l'extrudat.

. L'épaisseur

des feuilles est de 0,25 à 1 mm,

des plaques est > 1 mm. Dans ce cas, on utilise des cylindres polisseurs.

10.1.2 Extrusion - Gonflage

Films

L'épaisseur varie de 10 µm mini à 250 µm maxi, en moyenne 30 µm.

Suivant l'application, on utilisera des PE traités anti-U.V. (agriculture) ou transparents (sac, serres ...).

Après soudage, on obtient des sacs (publicité, poubelle ...).

Films thermorétractables

On fige à la sortie de l'étirage les macromolécules dans un état déformé (on peut imaginer des ressorts tendus). Un réchauffement pourra leur permettre de reprendre leur état stable conduisant à une rétraction (diminution des dimensions) et d'épouser ainsi parfaitement l'objet emprisonné (emballage, conditionnement ...).

Films étirés

On utilise le film dans le domaine des allongements de 5 à 20% pour maintenir des charges en palette de manutention.

Gaine expansée

Un agent gonflant se décompose en gaz lors de la phase d'extrusion (160 à 200°C) permettant ainsi l'expansion du produit (sacs, sets de table, nappe ...).

L'aspect final est esthétique.

La masse volumique apparente est de 0,5 et 0,6 g/m^3.

10.1.3 Extrusion - Soufflage

Les polyoléfines sont largement utilisés dans la réalisation de corps creux: bouteilles, bidons, réservoirs ... même de capacité élevée: réservoirs d'essence en PP pour voiture.

10.1.4 Extrusion pour revêtement de câbles

Les excellentes propriétés électriques du PE en font un produit très apprécié dans l'isolation de fils et câbles.

10.2 Enduction

Le polyéthylène est utilisé pour imperméabiliser divers supports (sac à engrais, emballages de meubles, films, savons, cartonnage de lait ...).

Le PE de bonne étirabilité, bonne stabilité thermique, sans odeur, est employé sur des papiers Kraft, cartons, cartons ondulés, cellophane, feuille d'aluminium, toile de jute ...

10.3 Moulage

10.3.1 Moulage par rotation (rotomoulage)

A partir de poudre (granulométrie ≈ 250 µm) on peut obtenir de grands récipients de formes complexes. L'épaisseur peut être très importante, jusqu'à 30 mm. Ex.: réservoirs, fosses, cuves.

10.3.2 Injection

La plage de températures d'injection du PE et du PP assez large en fait des matériaux simples à injecter (160 à 240°C).

- Tous les types d'alimentation du moule sont possibles: capillaire, directe, sous-marine, canaux chauds ...
- On peut jouer sur l'élasticité du matériau pour démouler. Contre dépouille jusqu'à 1% pour le PEbd.
- Le retrait important de ces polymères partiellement cristallins est important et peut entraîner des retassures, des déformations pour des pièces épaisses.

  Retrait de 2 à 3% et jusqu'à 4% .
- Les métaux, notamment le cuivre, sont des catalyseurs de dégradation et devront être évités au contact du polypropylène ou du polyéthylène (les inserts en cuivre sont à proscrire).

11. PROCEDES DE JONCTION

11.1 Collage

Les polyoléfines sont très difficilement collables. On doit procéder à des préparations de surfaces du type flammage (légère oxydation) ou attaque chimique.

11.2 Soudage

Le soudage par infrarouge, ultra-sons ou air chaud ne pose pas de problèmes.

Le soudage par injection (haute fréquence) est directement inapplicable car l'énergie dissipée dans le matériau est insuffisante pour l'échauffer. On peut palier cet inconvénient en noyant un insert métallique dans le matériau. L'échauffement de ce métal dans le plan de joint servira à la fusion du polyoléfine à souder.

LES POLYETHYLENES

PROPRIETES	UNITES	PEbd injection	PEbd soufflage	PEhd	PEhd +20%FV	PE UHMW
Masse volumique	g/cm^3	0,910-0,935	0,917-0,920	>0,955	1,09	0,935-0,950
Structure cristalline (taux)	%	65-70	—	65-90	—	—
Contrainte au seuil	MPa	10-13	10	28-30	30	20-25
Allongement au seuil	%	—	—	15	—	300-500
Contrainte de rupture	MPa	9-12	22	30-35	16	—
Allongement à la rupture	%	400-600	650	700-1000	17	200-500
Module de traction	MPa	150-300	—	420-1200	—	140-775
Module de flexion	MPa	60-400	—	1150-1500	4000	700-1200
Coefficient de POISSON		0,45	0,45	0,40	—	—
Résistance au choc	Mj/m^2	350-1000	2000	60-200	—	—
Dureté shore D		51	—	66	78	60-70
Température de fusion	°C	110-120	110	130	130	120-135
Température de transition vitreuse	°C	- 110	- 110	- 110	—	—
Température de fragilisation	°C	- 70	- 70	- 70	—	—
Température TFC (1,85 MPa)	°C	30-40	—	45-55	120	40-50
Température de résistance continue (contrainte)	°C	60	60	100	—	—
Conductivité thermique	W/mk	0,35	0,35	0,45-0,50	—	—
Retrait	%	1,5-3,5		2-4	—	—
Résistivité transversale	Ω.m	10^{17}	10^{17}	>10^{16}	$>10^{16}$	$>10^{16}$
Constante diélectrique 10^3 Hz - 10 MHz		2,3	2,3	2,3	2,5	2,3
Facteur de pertes diélectriques 10^3 Hz - 10 MHz		$3x10^{-4}$	$3x10^{-4}$	6à12x10^{-4}	6à30x10^{-4}	2.10^{-4}
Agents agressifs		tétrachlorure de carbone aromatiques, oxydants...		solvant chlorés et		
AVANTAGES		-Mise en oeuvre aisée: injection, extrusion, films... -Excellentes propriétés d'isolation électrique et de résistance aux chocs -Grande inertie chimique Qualité alimentaire		Mêmes propriétés que le PEbd mais avec une plus grande rigidité et une meilleure tenue en température		-Excellentes propriétés mécaniques -Bon frottement
INCONVENIENTS		Sensible aux U.V. en présence d'oxygène (air) -Sensible à la fissure sous contrainte -Mauvaise tenue à la chaleur Collage impossible (ou difficile) Retrait important Soudage HF impossible		Mêmes inconvénients que le PEbd		Mise en oeuvre difficile pièces obtenues par usinage, ou "forgeage"
APPLICATIONS		Application très variées: -Films: agricoles, sachetterie, emballages pour palettes (thermorétractable ou non) Récipients ménagers ou industriels: cuvettes, pots, bouteilles -Tuyaux souples -Isolants de câbles électriques -Jouets Coques de bateau ou de planche à voile		-Corps creux pour embouteillages rigides: bouteilles, flacons, bidons de lait, récipients pour lessives, detergents... -Grands récipients: fosses sceptiques, fûts... -Films d'emballage -Objets injectés: palettes de stockage, signalisation urbaine..		Implants chirurgicaux, engrenages, vis, coussinets..

LES POLYPROPYLENES

PROPRIETES	UNITES	PP	PP + 40% talc	PP + 48% FV	PP + 40% mica	PMB
Masse volumique	g/cm^3	0,90-0,91	1,23	1,15	1,24	0,83-0,84
Structure cristalline (taux)	%	60	—	—	—	—
Contrainte au seuil	MPa	35-40	32	50-60	35	
Allongement au seuil	%				10	
Contrainte de rupture	MPa	20-40	—		—	25-30
Allongement à la rupture	%	150-600	—		4 à 10	10-50
Module de traction	MPa	110-1600	—		3600	1100 à 2000
Module de flexion	MPa	1000-1500	4000	4000	3000-4000	700
Coefficient de POISSON		0,40	—		—	—
Résistance au choc	MJ/m^2			—		—
Dureté shore D		70	80		72	
Température de fusion	°C	168-169	—	—	—	230-240
Température de transition vitreuse	°C	-10	—	—	—	
Température de fragilisation	°C		—	—	—	
Température TFC (1,85 MPa)	°C	100	54		120-125	40
Température de résistance continue (sous contrainte)	°C	95	105	105	—	
Conductivité thermique	W/mk	0,15				
Retrait	%	1 à 2,5		0,5 à 1	0,5 à 0,8	1,5 à 3
Résistivité transversale	Ω.m	10^{16}		—	—	10^{16}
Constante diélectrique 100 Hz - 10 MHz		2,2 à 2,6		2,4	—	2,1
Facteur de pertes diélectriques 100 Hz - 10 MHz		5.10^{-4} à 2.10^{-3}		2.10^{-3} à 3.10^{-3}		2.10^{-5} à 2.10^{-4}
Agents agressifs						
		Tetrachlorure de carbone, solvants chlorés et aromatiques, oxydants				
AVANTAGES		- Meilleure tenue mécanique que les PE: module plus élevé, plus rigide - Excellentes propriétés en fatigue de flexion - Bonne tenue en température - Non-fissuration sous charge - Qualité alimentaire - Bonne inertie chimique				
INCONVENIENTS		- Sensible aux rayons ultra-violets en présence d'oxygène - Collage difficile voire impossible - Soudage impossible par hautes fréquences (pertes diélectriques trop faibles dans le matériau) - Formage difficile				
APPLICATIONS		- Films pour emballage alimentaire - Corps creux pour embouteillages rigides: bouteilles de lait - Tuyaux de circulation d'eau (capteurs solaires) - Pièces industrielles: bandes de protection latérales pour automobiles (chargées carbon black pour stabilisation UV), intérieurs de lave-vaisselle, batterie, boîte à charnière intégrée - Ficelles, bandelettes, cordes...				

LES STYRENIQUES

LES POLYSTYRENES (PS) ET LEURS COPOLYMERES (SB, SAN, ABS)

Les styréniques comprennent une grande variété de produits.

1. PREPARATION

Le polystyrène est obtenu par polymérisation du styrène fabriqué par alkylation du benzène par l'éthylène et déshydrogénation de l'éthylbenzène.

Le styrène liquide est polymérisé suivant la réaction de la figure 1 de deux façons:

- Polymérisation en masse: méthode délicate et abandonnée au profit de la méthode en suspension.
- Polymérisation en suspension: le styrène est dispersé en fines gouttelettes (0,1 à 10 mm) dans une phase aqueuse.

2. LES COPOLYMERES

2.1 Le polystyrène choc (SB)

Pour améliorer la résistance au choc notamment, on peut réaliser une polymérisation avec le polybutadiène (matière de nature caoutchoutique susceptible d'absorber l'énergie d'un choc). On réalise ainsi un copolymère greffé styrène butadiène (SB) appelé aussi **polystyrène-choc**.

2.2 Le polystyrène acrylonitrile (SAN)

La copolymérisation d'acrylonitrile avec un monomère styrène permet d'améliorer les propriétés mécaniques (module) et chimiques (bonne résistance aux hydrocarbures). La mise en oeuvre est plus délicate que pour le PS.

2.3 L'acrylobutadiène styrène (ABS)

. L'ABS est schématiquement obtenu en dispersant du butadiène dans une phase SAN.

La résistance au choc est très nettement améliorée (entre - 40°C et 80°C).

. L'ABS est opaque du fait de sa structure à deux phases.

. La résistance chimique est semblable à celle du SAN.

. Le thermoformage s'applique bien à l'ABS.

. L'ABS peut être métallisé (chrome).

3. PROPRIETES PHYSIQUES

Le polystyrène est un polymère amorphe donc transparent.

Le polystyrène choc (SB) modifié au caoutchouc (butadiène) est opaque ainsi que l'ABS.

Morphologie: l'examen au microscope d'un polystyrène choc permet de mettre en évidence des nodules sphériques de butadiène imprégnés de polystyrène et dispersés dans une phase styrénique.

Absorption d'eau: le PS absorbe peu d'eau < 0,2%.

Perméabilité: le PS (parce qu'il est amorphe) présente une perméabilité élevée comparé à d'autres thermoplastiques (PE, PA ...).

Propriétés optiques: le PS "cristal" peut convenir pour des systèmes optiques où il n'y a pas de problèmes d'abrasion.

4. PROPRIETES MECANIQUES

La température de transition vitreuse du PS amorphe est de 90 à 100°C. Notons que la masse moléculaire croissante entraîne une élévation de la transition vitreuse, assez nettement si $M < 10^5$ et faiblement si $M > 10^5$.

. Les propriétés mécaniques seront donc conservées des basses températures (- 40°C) et jusqu'à 70°C environ soit 20°C sous la transition vitreuse.

. Dans la plage des températures ambiantes, le PS est donc dur , cassant, fragile, rigide.

. Pour les polystyrènes choc (SB), la basse température de transition vitreuse de la partie caoutchouteuse (butadiène) [- 80°C] explique qu'au voisinage de 20°C et jusqu'à - 40°C cette phase

demeure souple et joue donc encore son rôle d'absorbeur de choc (exemple: contre-porte de réfrigérateur-congélateur).

5. PROPRIETES ELECTRIQUES

. Les PS sont des polymères non polaires et donc caractérisés par d'excellentes propriétés isolantes dans une large gamme de fréquences (50 à 10^6 Hz).

. Leur forte résistivité volumique fait des PS des matériaux très électrostatiques. Ceci peut compliquer des opérations de thermoformage en fixant des poussières qui marqueront la surface.

. Les faibles pertes diélectriques interdiront le soudage haute-fréquence.

6. PROPRIETES THERMIQUES

. Le PS contenant du carbone et de l'hydrogène sont combustibles.

. La température de décomposition du PS est de 320-350°C.

. Lors de sa combustion, le PS produit des fumées noires et denses de CO, CO_2 et H_2O et coule sous forme de gouttelettes.

Coefficient de dilatation linéaire: 6 à 8 x 10^{-5} mm/mm °C.

7. PROPRIETES DIMENSIONNELLES

. Les styréniques présentent une excellente stabilité dimensionnelle car reprenant peu d'eau.

. Etant un polymère amorphe, le PS ne présente qu'un faible retrait au moulage (0,4 à 0,7%).

8. PROPRIETES CHIMIQUES

. Les polystyrènes résistent bien aux acides dilués, aux solutions salines aqueuses et aux bases.

. Les acides très oxydants l'attaquent (nitrique).

. Le PS se dissout et gonfle dans de nombreux milieux organiques.

. Le SAN et l'ABS résistent bien aux hydrocarbures, huiles, graisses (intéressant pour les usages mécaniques).

. **Fissuration:** le PS choc en faibles épaisseurs, thermoformé, est sensible à la fissuration.

- Les colorants et charges inertes accentuent cet effet.
- L'addition de PS "cristal" dans un PS choc diminue cet effet de fissuration.

Produits agressifs pour les styréniques	Produits inactifs au contact des styréniques
acétone	acide acétique
alcool supérieur	acide citrique
benzène	alcool éthylique
chloroforme	bromure ...
chlorure de méthylène	café
dimethyl formamide	diéthylène glycol
essence (normale et super)	eau de mer
huiles essentielles	
tétrachloréthylène	
tétrachlorure de carbone	
toluène	
trichloréthylène	

9. CHARGES, RENFORTS

Coloration: les styréniques se colorent facilement et présentent des couleurs vives.

Stabilisation U.V.: il est indispensable de stabiliser les styréniques qui seront exposés aux rayons du soleil.

Antistatique: les producteurs proposent aujourd'hui des qualités antistatiques qui permettent d'avoir une couche interfaciale légèrement conductrice.

10. MISE EN OEUVRE

Les styréniques se mettent aisément en oeuvre par toutes les méthodes aujourd'hui applicables aux thermoplastiques compacts ou même expansés.

10.1 Injection

Avant l'injection et pour éviter une condensation qui pourrait exister sur les granulés, il est préférable d'étuver les PS.

- La température du moule sera de 30 à 50°C.
- On peut appliquer au PS tous les types d'alimentation du moule.

. Carotte froide en attaque directe.

. Injection capillaire valable pour pièces minces et d'épaisseur régulière (< 4 mm) conduisant à une injection à grande cadence.

. Injection sous-marine qui permet un décarottage automatique.

. Injection en nappe ou laminaire qui permet le moulage de pièces de bonnes propriétés mécaniques par orientation macro-moléculaire.

. Carotte chaude utile aux grandes séries.

Injection du PS allégé

Cette technique permet d'obtenir des pièces rigides à structure cellulaire de densité allant de 0,5 à 1 et d'épaisseur $\geqslant$ 4 ou 5 mm.

L'intérêt est:

. d'augmenter la rigidité des pièces moulées;

. de mouler de fortes épaisseurs;

. d'admettre des variations d'épaisseurs;

. de mouler des pièces de grandes dimensions sous faible pression.

Contrairement à l'injection des PS massifs, le point d'injection doit se trouver à l'endroit le plus mince de la pièce en PS allégé.

Une dépouille de 0,5° facilite le démoulage. Exemples d'applications: talons de chaussures, pinces à linge ...

Injection soufflage

Cette technique permet d'obtenir des corps creux de bonnes propriétés thermomécaniques (bouteilles, flacons, pots ...) sans soudure et avec une bonne définition du goulot.

Injection formage

Cette technique associe directement injection et thermoformage respectant le cycle suivant:

- préformage par injection;
- formage par transfert, sans refroidissement;
- éjection de la pièce refroidie.

Moulage du PS pré-expansé

A partir de petites sphères de PS pré-expansé. Cette technique permet l'obtention de pièces épaisses (épaisseurs > 8 mm) ou des panneaux en PS expansé utilisés comme emballages ou panneaux isolants dans le bâtiment.

On chauffe à la vapeur d'eau ces billes pré-expansées dans un moule fermé non étanche aux gaz. Cet échauffement à 100-120°C provoque une nouvelle expansion des perles qui remplissent les interstices et se forment en polyèdres soudés les uns aux autres.

10.2 Extrusion

Le PS se prête bien aux opérations d'extrusion pour la réalisation de feuilles, plaques, profilés. L'extrusion de complexes multicouches se développe. Cette technique permet une co-extrusion de plusieurs couches superposées de matières différentes. Exemples:

. feuilles bicolores deux faces: PS blanc et PS coloré;

. sandwich: PS vierge + PS recyclé + PS vierge;

. bimatières: PS + PVC ou PS + PE (avec couche de liaison pour adhésion).

Cette technique s'applique parfaitement au PLAXAGE qui consiste à presser un film décor sur une feuille extrudée encore chaude. Les films décors peuvent être en PS "cristal" de 5 à 15 µm.

Extrusion du PS allégé

On réalise ainsi des profilés avec une âme de faible densité 0,5 à 0,9 , une peau faiblement expansée. Ces profilés peuvent être cloués, collés, vissés ...

Extrusion du PS expansé

Lors de l'extrusion, on ajoute un agent porogène d'expansion (fréon) et de nucléation, on obtient ainsi des épaisseurs allant de 0,1 mm à 6 mm. Cette extrusion peut être suivie d'une opération de thermoformage (barquettes de viande, ...).

Extrusion de soufflage

Le PS se prête bien à cette opération qui permet la réalisation de corps creux: bouteilles ... mais qui sont fragiles.

10.3 Thermoformage

Les styréniques offrent au-dessus de leur température de transition vitreuse une grande plage de comportement viscoélastique. C'est-à-dire qu'à une température de 170°C, le polymère est facilement déformable et élastique ce qui est favorable au thermoformage.

Exemples: pots de yaourt (PS), bateau (ABS), planches à voile (ABS), carrosserie de voiture Ferrari (ABS).

11. PROCEDES DE JONCTION

11.1 Soudage

Les deux procédés les plus utilisés sont:

- le soudage ultra-sons,
- le soudage par friction.

. Le soudage ultra-sons: excellent pour le PS "cristal" mais la charge en butadiène du SB peut gêner son soudage.

. Le soudage par friction: on utilise l'échauffement provoqué par un frottement lors d'un mouvement de rotation ou angulaire alternatif.

11.2 Collage

Trois méthodes de collage s'appliquent aux PS:

- avec solvant du PS (toluène, chloroforme, chlorure de méthylène), mais cela peut conduire à une fissuration:
- avec solution de PS (10 à 20% de PS dans un solvant);
- avec colle spéciale (colle epoxy).

12. MARQUAGE - DECORATION

12.1 Métallisation sous vide

La vaporisation puis la condensation d'un métal sur une pièce en PS permet une métallisation, dans un but fonctionnel (miroir, projecteur ...) ou décoratif. On utilise l'aluminium, le cuivre, l'argent, l'or et la surface ainsi métallisée est protégée par un vernis.

12.2 Impression

L'impression se fait par:

. flexographie, qui utilise un cliché de caoutchouc portant l'impression en relief.

. Héliographie dont l'organe imprimant est un cylindre métallique gravé en creux.

. Sérigraphie.

. Offset.

LES STYRENIQUES

LES POLYSTYRENES (PS) ET LEURS COPOLYMERES (SB,SAN,ABS)

PROPRIETES	UNITES	PS Cristal	PS choc (SB)	PS expansé	ABS	SAN
Masse volumique	g/cm^3	1,04-1,05	1,04	0,02-0,06	1,03-1,08	1,08
Transmission de lumière	%	90	—			
Contrainte à la rupture	MPa	41	27	0,15à0,4	40-60	70
Allongement à la rupture	%	4	35-50	—	20-60	5
Résistance à la flexion	MPa	69	49-60	0,2à0,5	70-80	100
Module de traction	MPa	3000	2200	—	2500	3000-4000
Module de flexion	MPa	3100	2000	—	2500	< 4000
Coefficient de POISSON ν		0,35		—	—	
Résilience choc CHARPY	$N/cm/mm^2$	180	550	—	500	200
Dureté				—	—	
Température de fusion	°C	—	—	—	—	
Température de transition vitreuse	°C	90	90	—	105-115	115
Température de fragilisation	°C	—	—	—	—	—
Température TFC (1,85 MPa)	°C	85-90	75-80	—	95	90-105
Température de résistance continue	°C	70	—	70	—	90
Retrait	%	0,1 à 0,7	0,2 à 0,6	—	0,4 à 0,9	0,2 à 0,7
Conductibilité thermique	W/m.k	0,16	0,16	—	—	
Résistivité transversale	Ω.cm	5.10^{16}	10^{16}	—	10^{16}	10^{16}
Constante diélectrique 50 Hz à 10^6 Hz		2,66	2,4à3,8	—	2,4à5	2,6à3,4
Facteur de pertes diélectriques 50Hz à 10^6 Hz		2,5 à $1,7 \times 10^{-4}$	6×10^{-2}	—	3.10^{-1} à 8.10^{-3}	10^{-2} à 6.10^{-3}
AVANTAGES		Rigide Bonne stabilisation dimensionnelle Alimentaire Bon isolant Faible Retrait Transparent	Meilleure résistance au choc que PS	Faible densité Forte épaisseur Excellent isolant thermique Facile à coller	Bonne tenue aux chocs Bonne stabilité dimentionnelle Surface dure et Résistant à la rayure Grandes variétés de couleur Formage aisé	Bonne résistance aux chocs et à la rayure Bonne stabilité dimensionnelle
INCONVENIENTS		Cassant Peu résistant aux chocs Electrostatique Mauvaise résistance aux essences	Moins rigide que PS Plus difficile à souder Opaque	Peu rigide Inflammable	Opaque Electrostatique	Plus difficile à souder
APPLICATIONS		Emballage pots de yaourts, présentoir thermoformé, Armoire de toilette, Diffuseur optique, Jouets PS allégé Talon de chaussure Pince à linge	Ameublement armoire de toilette contre-porte de réfrigérateur ou de congélateur	Emballage "sur mesure" antichoc Boîte à oeufs, emballage d'objets fragiles appareils photos... Panneau isolant pour bâtiment	Capotage d'électroménager meubles ou sièges "design" coques de bateaux (thermoformées) planches à voiles pièces automobiles pouvant être chromées	Capotage d'électroménager Boîtier de téléphone

LES POLYCHLORURES DE VINYLE ET LEURS DERIVES (PVC)

1. PREPARATION

Le chlorure de vinyle $CH_2 = CHCl$ est un gaz incolore, liquide à 14°C et sous une pression de 4 bars. On l'obtient:

- par le procédé classique: partant de l'acéthylène;
- par un procédé récent: éthylène + chlore.

$$+CH_2-CH+_n$$
$$|$$
$$Cl$$

Polychlorure de vinyle PVC

1.1 Polymérisation

La polymérisation de ce produit est aujourd'hui conduite suivant trois méthodes:

. Polymérisation en **émulsion.**

Le chlorure de vinyle est maintenu en émulsion stable dans l'eau avec des émulsifiants. La polymérisation est activée par des **amorceurs solubles dans l'eau.** Après séchage de l'émulsion, on obtient des "grains" de PVC de 15 à 200 µm de diamètre.

. Polymérisation en **suspension**

La polymérisation du chlorure de vinyle dispersé en fines gouttelettes dans l'eau est activée par des **amorceurs solubles dans le monomère.** Le PVC est séparé de l'eau par centrifugation, décantation, séchage.

. Polymérisation en **masse**

Cette méthode permet d'éviter l'eau et les dispersants, la difficulté étant d'évacuer la chaleur de réaction. Le PVC ainsi fabriqué est exempt d'adjuvants et présente une structure avantageuse pour la mise en oeuvre.

1.2 Gélification

Quelle que soit la méthode de polymérisation, le PVC se présente comme un poudre blanche qui doit subir une gélification pour le rendre utilisable. On profite de cette gélification pour associer au PVC:

. **des stabilisants** qui permettent d'absorber l'HCL qui se forme lors d'une chauffe du PVC (stabilisants au plomb, cadmium, baryum, étain ...);

. **des lubrifiants** qui évitent au PVC de coller aux parois métalliques chaudes (lubrifiants externes) ou qui diminuent le frottement interne de la masse plastifiée (lubrifiant interne);

. **des plastifiants** qui diminuent les forces de liaisons intermoléculaires et qui modifieront la rigidité de l'objet fini. La température de transition vitreuse du PVC pur étant de 78°C, les plastifiants permettront une plus grande mobilité moléculaire sous Tv et donc un comportement souple et une meilleure résistance au choc.

Trois procédés de plastification sont applicables.

+ **Plastification externe**

L'effet sera de diminuer la température de transition vitreuse (°C) pour offrir une grande flexibilité du PVC plastifié à température ambiante (paraffines chlorées).

+ **Plastification interne**

Les puissantes forces de liaison dipolaire ente les chaînes de PVC sont affaiblies par l'introduction d'éléments copolymérisables à action dipolaire faible ou nulle.

+ **Plastification par polyblends** (mélange de polymères)

On réalise un mélange physique de PVC et de polymère (polyéthylène chloré) compatible qui affaiblira les forces de liaison.

. **des colorants et pigments;**

. **des charges** (craie, kaolin ...);

. **des agents antistatiques.**

1.3 Plastisols

La pâte de PVC en suspension dans des plastifiants et stabilisants est réalisée sur mélangeur ou pétrin mécanique. Ces plastisols serviront à l'enduction, au revêtement de pièces métalliques à chaud.

2. POLYMERES DERIVES ET COPOLYMERES

2.1 Le polychlorure de vinyle surchloré PVCC

Par chloration du PVC, on fait passer le taux de chlore de 57 à 72% en poids. Le PVCC offre une plus grande plage d'utilisation en température ($\leqslant$ 100°C) mais est plus fragile. Ses applications se trouvent dans la fabrication:

- de tubes, pour circulation de fluides chauds
- de raccords
- de plaques ou feuilles qui seront thermoformées ou assemblées pour la construction de pièces dont les températures de service atteindront 100°C.

2.2 Le polychlorure de vinylidène PVDC

Le PVDC est surtout utilisé en copolymérisation avec un PVC. Son excellente tenue chimique en fait un matériau utilisé dans la fabrication de conteneurs chimiques.

2.3 Le copolymère chlorure de vinyle et propylène VC/P

$$+CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}+_n$$

Ce copolymère contient 2 à 10% de propylène. Ce copolymère transparent ou opaque est plus facile à mettre en oeuvre que le PVC.

Applications: récipients, jouets, matériel médical.

2.4 Le mélange chlorure de vinyle et éthylène chloré PVC/E

La résistance au choc est améliorée même à basses températures (cadre de portes, fenêtres ...).

2.5 Le mélange de chlorure de vinyle et acrylo-butadiène styrène PVC/ABS

Les propriétés mécaniques sont nettement améliorées surtout au choc (tuyaux, pièces d'électroménager, raccords ...).

2.6 Le copolymère chlorure de vinyle/acétate de vinyle PVC/AC

La résistance au choc ainsi que l'injection est améliorée. Cette copolymérisation augmentera la solubilité, la stabilité à la lumière et diminuera les résistances mécaniques, chimiques et thermiques.

3. PROPRIETES PHYSIQUES

Le PVC est un polymère atactique donc essentiellement amorphe, mais il arrive que, localement, sur de courts segments de chaînes, le PVC soit syndiotactique et puisse s'organiser en phase cristalline, mais le taux de cristallinité ne dépasse jamais 10 à 15%.

La masse volumique du PVC est de 1,38 g/cm^3.

Le PVC amorphe est transparent et relativement perméable à la vapeur d'eau.

La masse moléculaire moyenne du PVC est généralement donnée par le "K-wert" ou "valeur K". Lorsque le K-wert augmente, la résilience, la stabilité dimensionnelle à chaud et la résistance au fluage augmentent alors que la transformation devient plus difficile.

4. PROPRIETES MECANIQUES

. Le PVC offre une excellente rigidité jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse.

. Les PVC offrent une excellente résistance à l'abrasion.

. Les PVC sont fragiles au choc à basses températures (< -10°C).

5. PROPRIETES CHIMIQUES

. Le PVC non plastifié résiste bien aux acides et bases ainsi qu'aux huiles, alcools et hydrocarbures aliphatiques. Par contre, il est sensible aux hydrocarbures aromatiques et chlorés, aux esters et cétones.

. Le PVC souple est sensible aux agents atmosphériques et à la lumière solaire. Il peut poser des problèmes de séparation de plastifiant.

6. PROPRIETES ELECTRIQUES

Le PVC présente de bonnes propriétés isolantes mais les pertes électriques dans le matériau sont suffisamment importantes pour permettre le soudage par haute fréquence.

7. PROPRIETES THERMIQUES

Le PVC (amorphe) présente sa température de transition vitreuse entre 75 et 80°C, c'est dire qu'à température ambiante il est rigide et qu'au-dessus de 90°C il est caouchouteux (faible résistance, grande déformation).

L'addition de plastifiants, en diminuant les forces de liaison intermoléculaires, diminue la température de transition vitreuse, ce qui permet de proposer un PVC souple à température ambiante (Tv étant alors inférieure à 0°C) [voir fig. 1].

Tenue du feu: le PVC se décompose dans une flamme en libérant de l'acide chlorydrique gazeux mais il est auto-extinguible. Les PVC plastifiés brûlent olus facilement.

8. PROPRIETES DIMENSIONNELLES

Le PVC présente une bonne stabilité dimensionnelle et un retrait limité dû à sa structure amorphe.

9. CHARGES, RENFORTS, ADDITIFS

Pour des applications spécifiques, on peut charger le PVC avec:

CRAIE: peu chère, charge jusqu'à 50%, améliore l'isolation.

KAOLIN: améliore la résistance aux rayures.

TRIOXYDE D'ANTIMOINE: 5 à 10% combiné avec des paraffines chlorées donnent du PVC souple difficilement inflammable.

Plage de température de transition
vitreuse du PVC souple en fonction de
la teneur en plastifiant

Teneur en plastifiant

10. MISE EN OEUVRE

Le producteur propose aux transformateurs le PVC déjà préparé avec des stabilisants, plastifiants, charges ... sous forme de:

- mélanges à sec (dry blend),
- agglomérés,
- granulés.

A partir de ces produits, on peut donc utiliser les procédés de mise en oeuvre classique pour les thermoplastiques.

10.1 Calandrage

Le calandrage permet la fabrication en continu de feuilles.

. Les mélanges de **PVC souple** sont plastifiés sur des mélangeurs à rouleaux, des malaxeurs ou des extrudeuses bi-vis. La masse plastifiée alimente les 4 cylindres de la calandre. Les feuilles calandrées sont livrées au choix: lisses ou grainées, unies ou marbrées (couvertures souples de documents, pochettes ...). On peut se servir du calandrage pour fixer une feuille PVC sur un support de nature différente (tissus) pour faire des alèses, bâches ...

. Les **PVC rigides** sont calandrés sur des cylindres disposés en L ou 1. Les feuilles ainsi obtenues servent au thermoformage de barquettes, emballages ... ou à la fabrication de feuilles de placage pour meubles, articles décoratifs ...

10.2 Extrusion

10.2.1 Extrusion de PVC rigide

Il faut des outillages polis chromés dur ou nickelés ou mieux, en acier inox.

L'extrusion du PVC rigide, plus délicate que celle du PVC souple, permet l'obtention:

- de tubes et profilés largement utilisés dans la distribution d'eau potable, l'évacuation d'eau usée, les égouts, les drainages mais aussi les plinthes, gouttières, volets roulants ...
- de plaques jusqu'à 15 mm d'épaisseur,
- de feuilles transparentes type "cristal" obtenues soit sur filière plate, soit par gaines soufflées,
- de fils ou crins utilisés pour la fabrication de brosses, pinceaux, balais ...

L'étirage (vers 95°C) de fils de PVC décuple leur résistance à la rupture (rapport d'étirage 1/2,5).

10.2.2 Extrusion de PVC plastifié

- Les profilés de PVC souple ne sont pas calibrés et servent à la réalisation de tuyaux d'arrosage, garnitures de sièges, profilés,

couvre-joints ...

- Les plaques et revêtements de sols sont extrudés par filières plates et plus rarement par filières circulaires.

La gainage de fils, câbles électriques, représente un important débouché pour le PVC.

La vitesse de production peut atteindre 800 à 1000 m/min. On rencontre aujourd'hui des fils isolés par du polyéthylène revêtu PVC.

10.2.3 Extrusion soufflage

Le PVC se prête bien à la fabrication de corps creux par soufflage (bouteille d'eau minérale, de vin ...).

10.3 Enduction

Les plastisols essentiellement à base de PVC émulsion permettent l'enduction de textile, papiers, toiles pour fabrication de bâches, revêtements de sols et de murs ...

10.4 Procédé au trempé

Un modèle métallique chaud (130 à 150°C) est plongé dans du PVC. Après gélification et refroidissement, on détache le film de PVC de son modèle pour donner des gants, bottes, capuchons, etc.

Si une forme textile était positionnée, celle-ci se trouverait emprisonnée dans le PVC améliorant la tenue mécanique. Ce procédé existe à froid aussi et la gélification se fait dans un four.

10.5 Coulée

La coulée en coquille consiste à remplir de PVC un moule métallique chauffé puis, une couche de PVC étant gélifiée, à vider l'excédent de pâte avant la gélification définitive. On peut souder deux parties de pièces, c'est ainsi que les ballons sont réalisés.

10.6 Rotomoulage

Le rotomoulage permet d'obtenir des corps creux de fortes épaisseurs.

10.7 Expansés

Les pâtes PVC peuvent être expansées

- soit par voie physique avec un gaz inerte, azote, CO_2 ...,
- soit par voie chimique et décomposition d'un agent porogène (azodicarbonamide).

Applications: isolation.

10.8 Injection

L'injection de PVC rigide doit se faire par carotte normale. La décomposition thermique du PVC peut conduire à une attaque des outillages. En injection, on obtient des robinets, vannes, raccords ...

L'injection soufflage permet la réalisation de récipients pour cosmétiques, pharmacies ...

10.9 Thermoformage

Le PVC se forme très bien à chaud pour donner des pièces telles que: récipients, cuves, réservoirs, citernes ...

11. PROCEDES DE JONCTION

11.1 Collage

Le PVC se colle aisément sur de nombreux matériaux.

- Colles aux solvants.
- Colles contact: polyuréthane.
- Colles fusibles: copolymère vinylique.

11.2 Soudage

Le soudage du PVC est assez aisé.

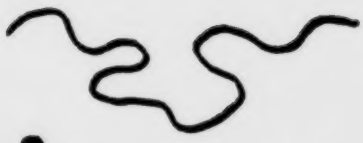
- A l'air chaud avec baguette d'apport (230°C).
- Hautes fréquences.
- Par friction.

LES POLYCHLORURES DE VINYLE
ET LEURS DERIVES (PVC)

PROPRIETES	UNITES	PVC rigide	PVC souple	VC/P	PVCC	PVDC
Masse volumique	g/cm^3	1,38	1.3-1,7	1,30-1,40	1,50-1,55	1,65-1,70
Contrainte à la rupture	MPa	50	10-20	35-50	60	21-35
Allongement à la rupture	%	10-50	200à500	100-140	4,5	200
Résistance à la flexion	MPa	70-80		70-90	2800	15-20
Module de traction	MPa	2400		2400-4000	2800	350-360
Module de flexion	MPa	2000		2400-3000	100-200	
Coefficient de POISSON ν		0,35	0,5	0,35	–	
Résilience	J/m	50-200		20-100		15-50
Dureté shore D		70-84	20-40	81		
Température de fusion	°C	160-170	140-170	–	–	–
Température de transition vitreuse	°C	75-105	-40	70	–	–
Température de fragilisation	°C	–	-30	–	–	–
Température TFC (1,85 MPa)	°C	60-70	–	65-75	95-105	80-90
Température de résistance continue	°C	10 à 70	-35 à 70	65	100	70-93
Retrait	%	0,1 à 0,5	0,8 à 3	0,25 à 0,35	–	–
Conductibilité thermique	W/m.k	0,16	0,16	–	–	–
Résistivité transversale	Ω.cm	10^{16}	10^{11}	10^{16}	10^{14}	10^{14}-10^{16}
Constante diélectrique 50 Hz à 10^6 Hz		3,4	3 à 5	2,8 à 3,7	3,5 à 6	3,5 à 6
Facteur des pertes diélectriques 50 Hz à 10^4 Hz		70.10^{-4}	0,1 à 0,15	10^{-2} à 8.10^{-3}	2.10^{-2}	3.10^{-2} à 8.10^{-2}
AVANTAGES		Bonne rigidité jusqu'à 70°C Bonne stabilité dimensionnelle auto-extinguible Alimentaire Bonne tenue chimique	Souple utilisable à basse température	Plus grande utilisation à basse température Bonne Résistance aux vieillissements	Bonne tenue thermique	Excellente tenue chimique Alimentaire
INCONVENIENTS		Fragile à basse température Sensible aux U.V.	Tenue chimique moins bonne que PVC rigide non alimentaire	Moins dur que le PVC rigide	Pas transparent Faible résistance aux chocs	
APPLICATIONS		Tuyauterie: alimentation en eau, évacuation d'eau, drainage, gouttières, plinthes, barrières d'extérieurs	Tuyaux eau ou gaz Lacets, Cordes à sauter Gainage de fils	Profilés pour fenêtres, bancs, bardages, gouttières, revêtements de façade	Tubes pour fluides chauds ou emballages de produits encore chauds	Récipients pharmaceutiques ou devant résister aux bactéries

STRUCTURE

I) MACROMOLÉCULES LINÉAIRES



i) homopolymère A-A-A-A

A: motif monomère

ii) copolymère

A-B A-B copolymère alterné

A-A-A-A-A-B-B-B-B- bloc

A-BB-A-B-A-A-B-A-A-A aléatoire

II) POLYMÈRES NON-LINÉAIRES

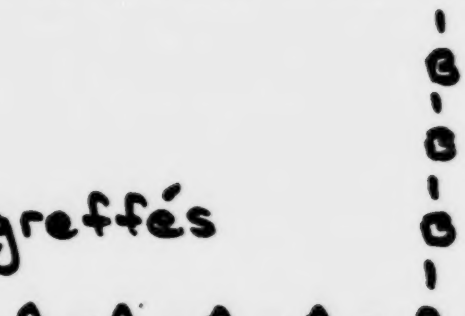
i) branché

PE basse densité

branche < 6 atomes

PE linéaire basse densité

ii) polymères greffés

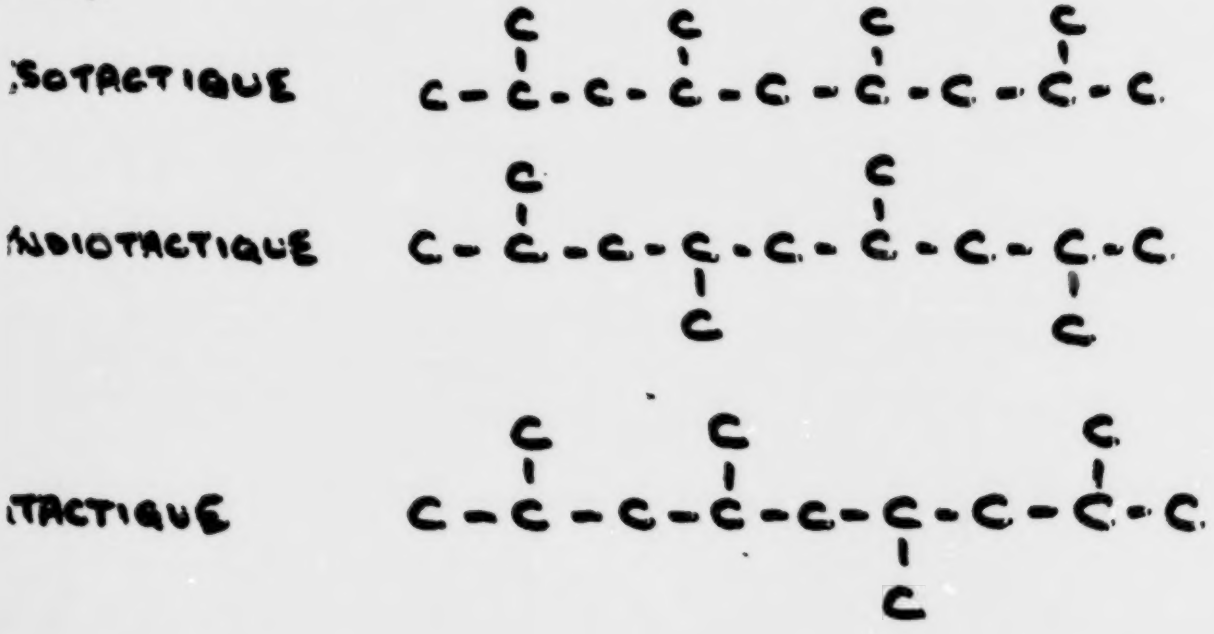


ex. acide de polyacrylique greffé au polyéthylène

iii) polymères à trois dimensions

> 2 fonctionalités

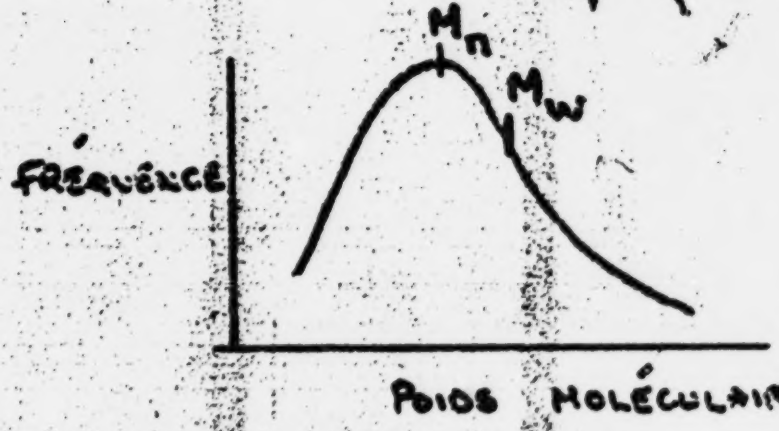
III) STÉRÉO - ISOMÉRIE



POIDS MOLÉCULAIRE (M)

I) DESCRIPTION

- Poids de 6.02×10^{23} molécules
- M influence
  - propriétés mécaniques
  - transitions amorphes
  - cristallisation
  - viscosité
- polydisperse – plusieurs longueur de chaîne
  ex. polymères synthétiques (plupart)



$\bar{M}_n \equiv$ poids moyen en nombre $= \dfrac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}$

$\bar{M}_w \equiv$ poids moyen en poids $= \dfrac{\sum w_i M_i}{\sum w_i} = \dfrac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i}$

$w_i \equiv$ poids d'espèce i

$N_i \equiv$ nombre d'espèce i

$M_i \equiv$ poids moléculaire

II) MESURES DE POIDS MOLÉCULAIRES

principales méthodes { i) viscosité
ii) chromatographie par perméation de gel

i) viscosité

- mesure de la friction interne d'un liquide

$$[\eta] = K M^a$$

viscosité relative $\eta_{rel} = \eta/\eta_0$

" spécifique $\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$

" réduite η_{sp}/c

" intrinsèque $[\eta] = \left(\frac{\eta_{sp}}{c}\right)_{c=0}$

a et K sont des constantes d'un système polymère-solvant à une temps donné

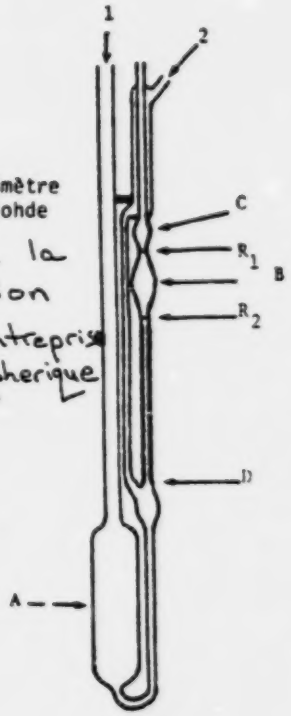


Figure 1: viscosimètre d'Ubbelohde

- independant de la quantité de solution
- etude est entreprise à pression atmospherique

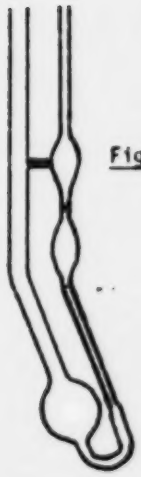


Figure 2: viscosimètre Cannon-Fenske

- temps d'écoulement est mesuré pour la solution (η) et le solvent pur (η_o)

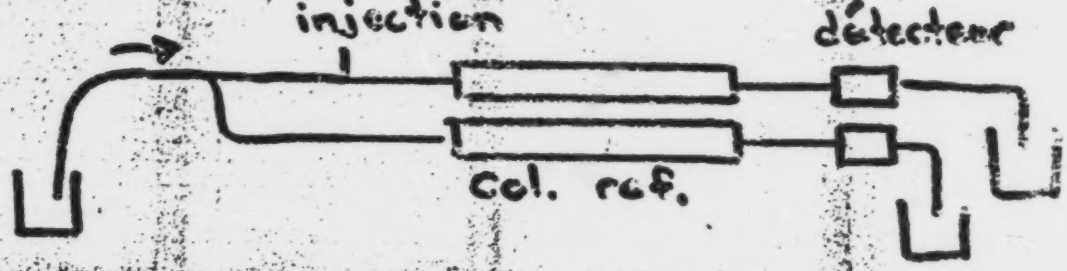
$$\eta_{rel} = \eta/\eta_o \simeq t/t_o$$

ii) chromatographie par perméation de gel

phase mobile - solvant liquide

phase stationnaire - même liquide immobilisé dans le gel

mécanisme de séparation - molécules de poids élevé sont exclues des pores et traversent la colonne rapidement



$V_{élué} = V_M + K V_L$

$V_e \equiv$ volume élué pour une espèce

$V_M \equiv$ volume de phase mobile

$V_L \equiv$ volume des pores

$K \equiv$ fraction des pores accessibles à

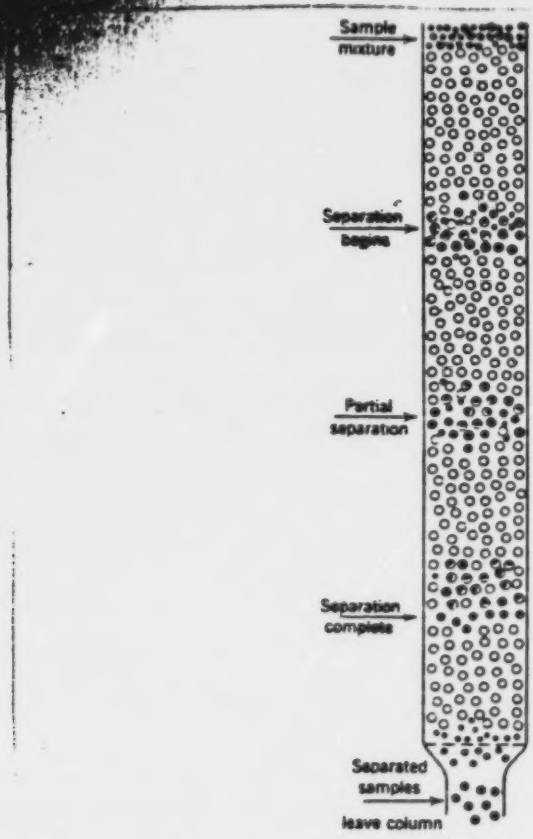


Fig. 2-17. Principle of the separation of molecules according to size by gel permeation chromatography (after Cazes 1966 and Billmeyer 1969).

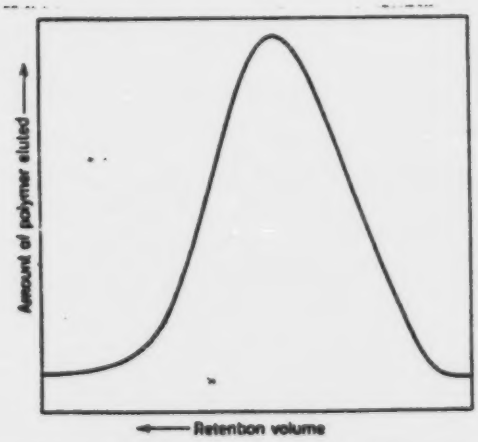


Fig. 2-18. A typical gel permeation chromatogram. Polystyrene in tetrahydrofuran $\bar{M}_w/\bar{M}_n = 2.9$.

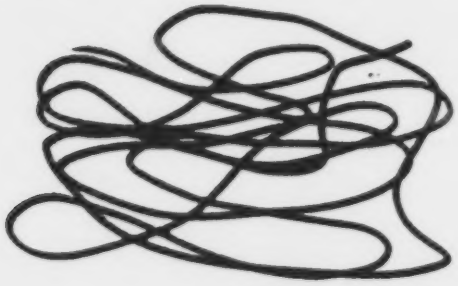
CRISTALLISATION

Polymères

- amorphe
- cristallins (semi-cristallins)

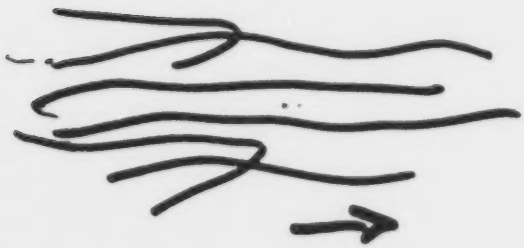
I) Polymères amorphes

- structure semblable aux liquides
- absence d'ordre moléculaire



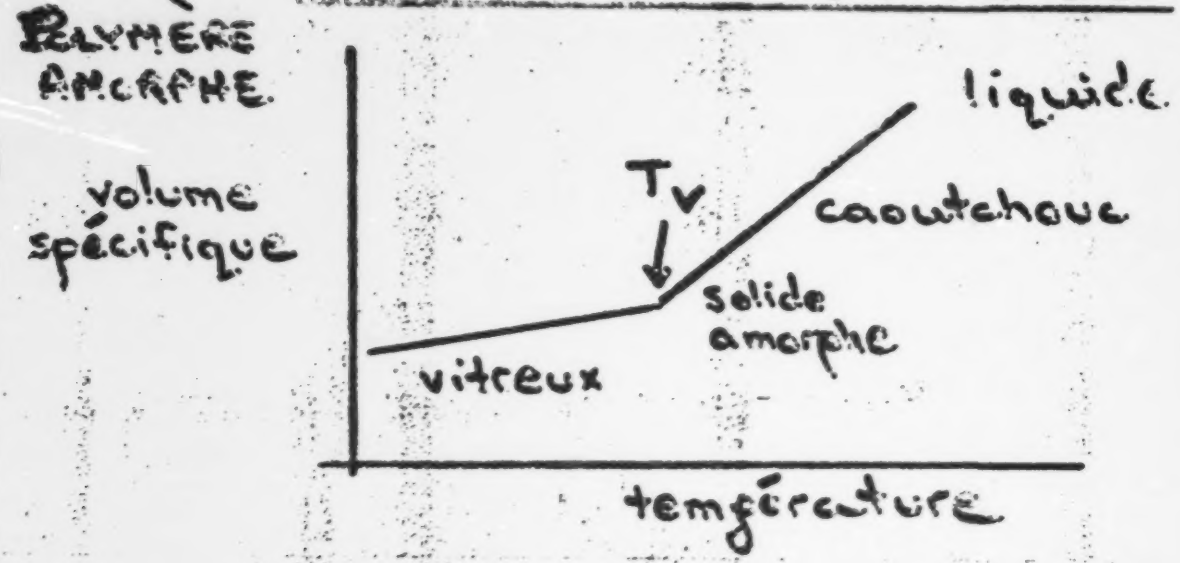
- organisation aléatoire

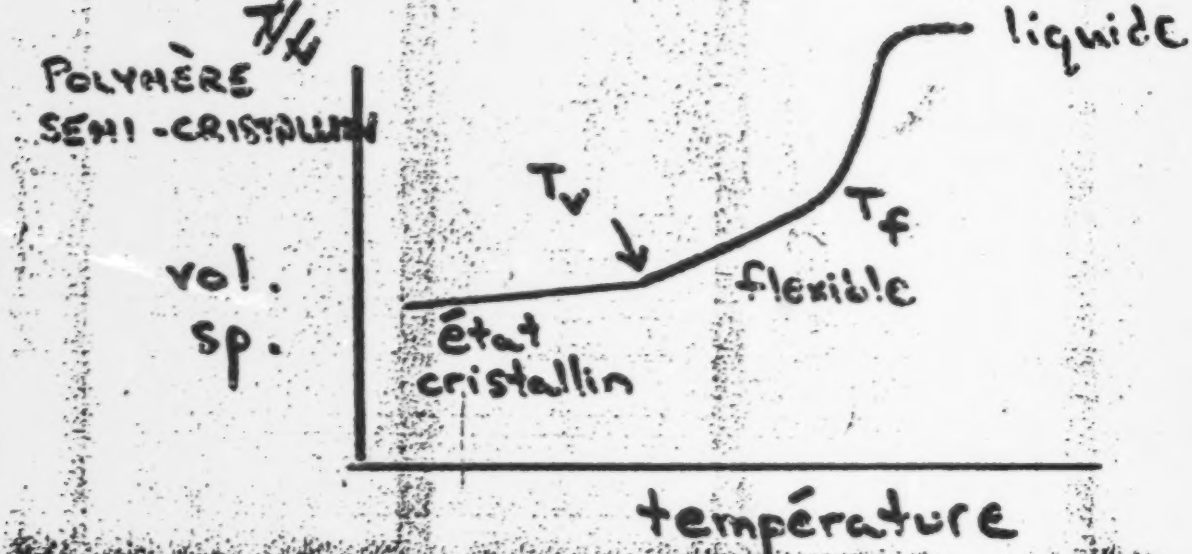
ex. PS atactique
PVC



déformation → orientation

EFFETS THERMIQUES



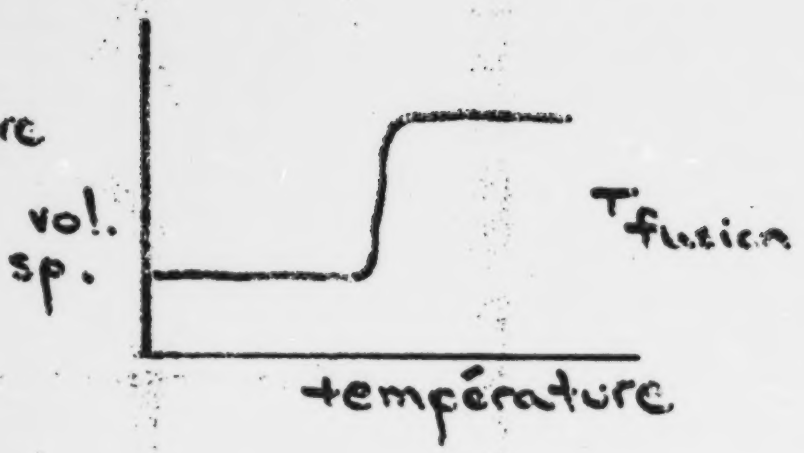


T_v est une transition caractéristique de la partie amorphe

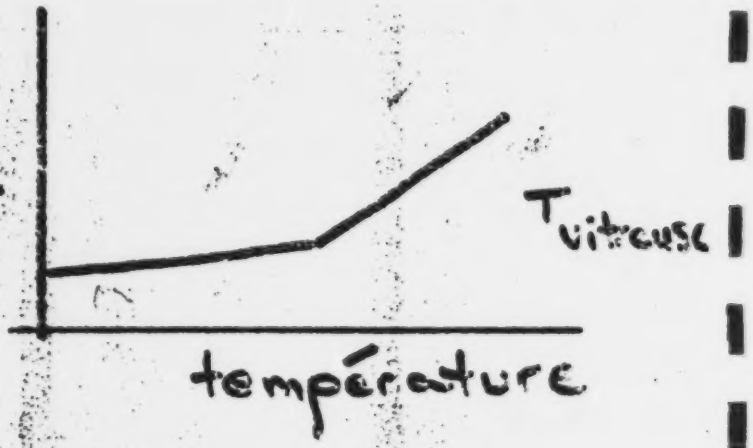
T_v - mouvements des segments de molécules (chaînes)

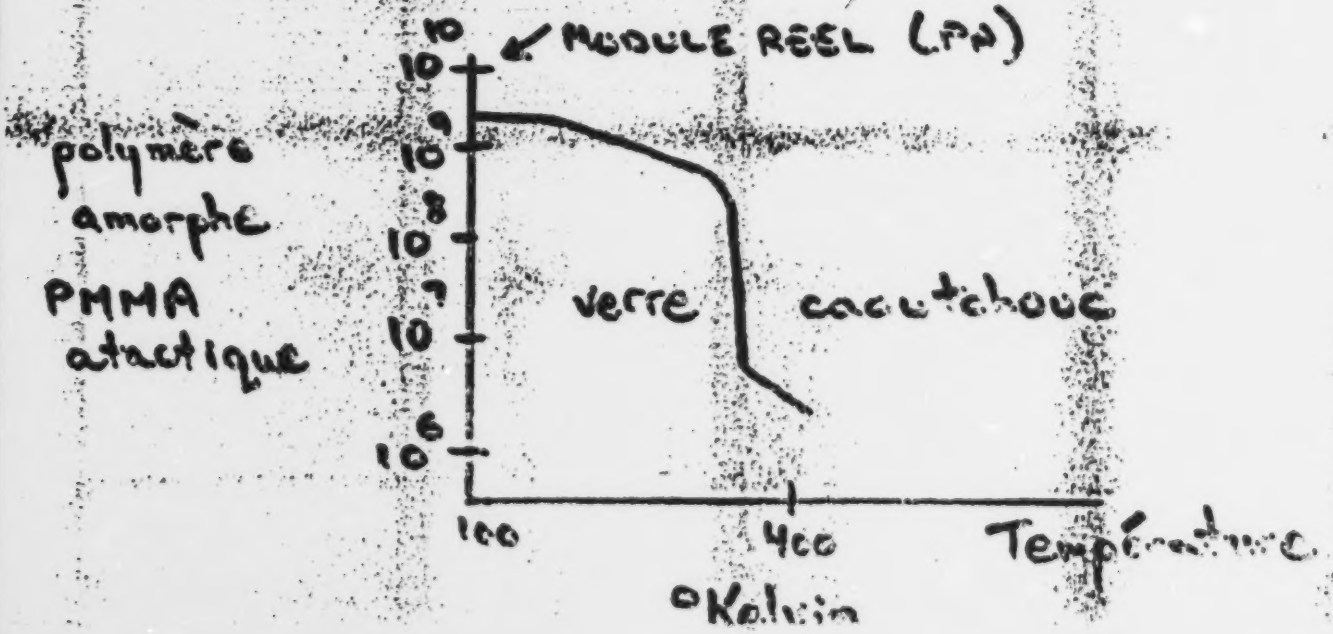
- transitions de l'état vitreux à l'état caoutchoutique

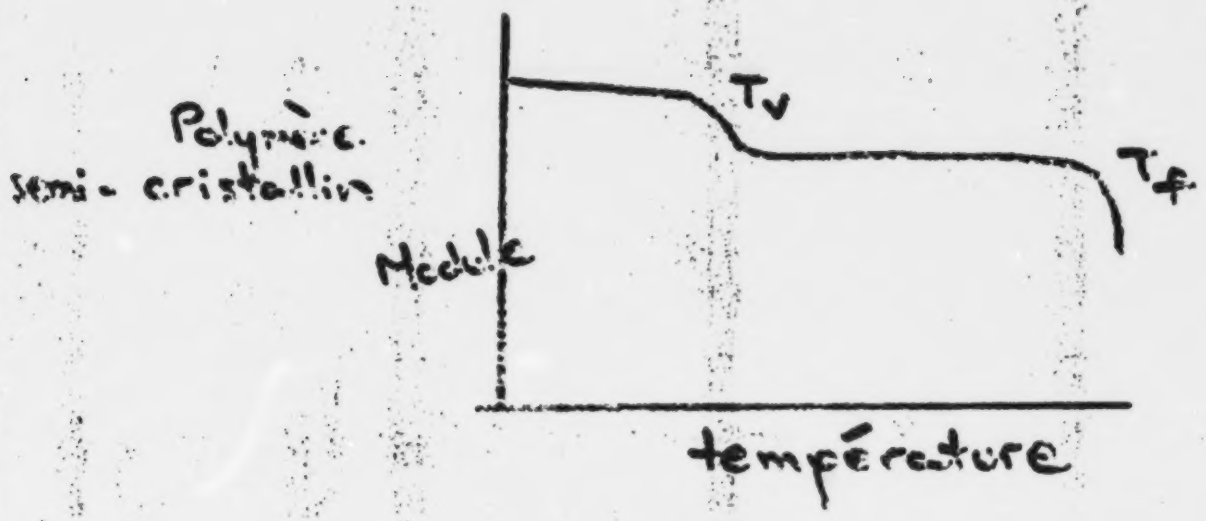
transition 1ere ordre



transition 2ième ordre



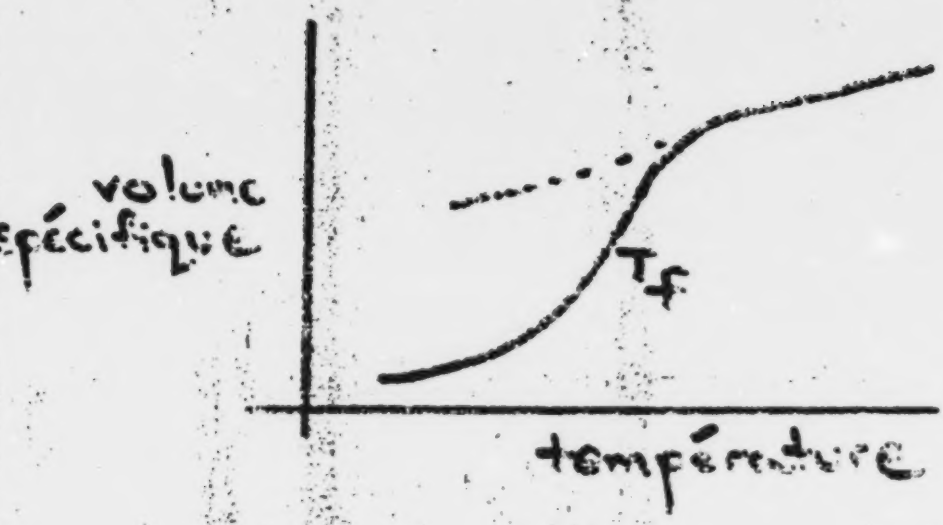




- le T_v ↑ avec poids moléculaire

Température de fusion

- transition cristallinne ⇄ liquide
- les liaisons fortes → T_f ↑
- ↑ rigiditée du squelette T_f ↑
- ↓ poids moléculaire , T_f ↓
- T_f est independant du taux de cristallinité



les polymères démontrent en plusieurs cas un effet de surrefroidissement.

LES THERMOPLASTIQUES

Sami Y. Sourour, ing.*

Résumé

Comparées aux matériaux traditionnels, les matières plastiques, dérivés synthétiques du pétrole, présentent de nombreux avantages : coût, poids, économie d'énergie, facilité de mise en œuvre, inertie chimique. La variété croissante des résines offertes aujourd'hui présentent aux concepteurs un choix plus vaste de caractéristiques utiles. La consommation de plastiques, surtout dans le domaine du transport devrait continuer de croître. Les thermoplastiques renforcés se sont affirmés dans plusieurs secteurs industriels à cause des propriétés exceptionelles que leur confère le renforcement. Dans les années à venir, l'accent sera sur une meilleure productivité et la conservation d'énergie.

Introduction

Les deux dernières décennies ont été marquées par une croissance spectaculaire de l'usage des plastiques dans le domaine industriel et auprès du consommateur. Grâce à leurs caractéristiques physiques, leur facilité de transformation, leurs mérites économiques et leur faible teneur énergétique, les plastiques ont déjà conquis de nombreux marchés, aux dépens d'autres matériaux traditionnels comme le verre, les métaux, le bois et le papier. Ainsi, les plastiques font continuellement de nouvelles percées dans divers secteurs tels que l'emballage, l'industrie de l'automobile, le bâtiment, le téléphone, les domaines de la médecine moderne et de l'agriculture, etc. Ils se sont avérés utiles dans la fabrication de plusieurs articles de loisir et d'appareils électro-ménagers.

Comme tels, les plastiques offrent au concepteur de nombreuses possibilités. Cependant, l'exploitation maximale de leur potentiel véritable requiert une connaissance plutôt approfondie de leurs propriétés physiques et des différentes méthodes de transformation.

---

* *M. Sami Y. Sourour est présentement directeur des ventes – plastiques de Du Pont Canada Inc. à Montréal. Diplomé en génie chimique de l'Université McGill à Montréal, il détient aussi une maîtrise et un PhD en génie chimique. Le prix « Plastics Education » lui a été décerné par la Société des Ingénieurs en Plastique, section du Québec. Il a contribué à plusieurs publications et a présenté plusieurs conférences techniques dans le domaine des plastiques.*

L'auteur désire remercier Mme Sally A. Woods, de la compagnie Du Pont Canada, pour son aide précieuse dans la préparation de cet article.

Cet article passe en revue les caractéristiques générales des différentes familles de thermoplastiques, incluant les thermoplastiques renforcés. Des exemples d'usages typiques dans une variété de domaines et dans l'industrie canadienne en particulier y sont illustrés.

Les principaux procédés de mise en œuvre sont brièvement décrits. Les mérites ainsi que les limitations des matières plastiques comparées aux métaux sont discutés. L'usage des plastiques dans l'automobile est particulièrement souligné par rapport aux avantages qu'apportent les plastiques dans notre ère de conservation d'énergie.

Enfin, l'article donne un aperçu général des possibilités et de l'avenir des thermoplastiques en tenant compte d'innovations dans le matériau et dans la technologie de fabrication, ce qui ouvre des perspectives très variées au niveau des applications.

Les plastiques et la pétrochimie

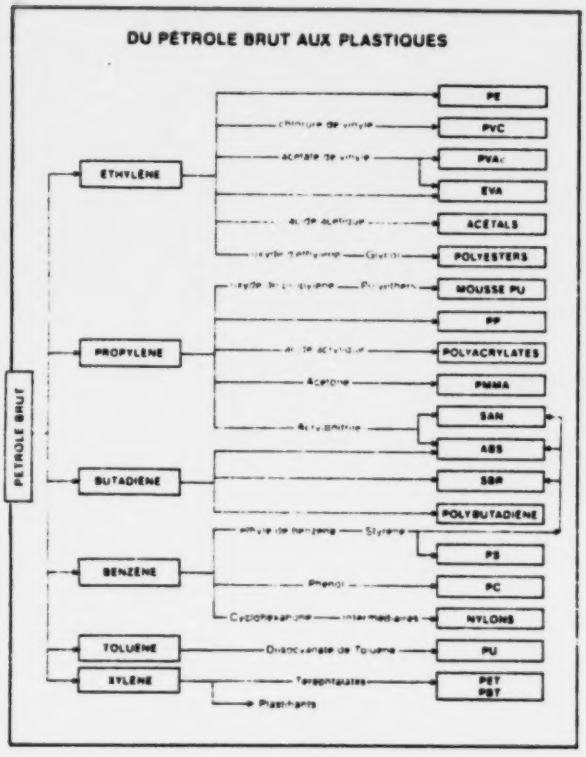
D'où proviennent les plastiques ?
Les résines plastiques sont fabriquées à partir de produits organiques primaires dont la source réside dans le pétrole brut et dans le gaz naturel. En fait, l'industrie canadienne des plastiques utilise approximativement 3% de la consommation domestique totale de pétrole brut et de gaz naturel [1].

On peut distinguer deux types de produits pétrochimiques primaires à partir desquels les matériaux plastiques sont synthétisés :

(a) le groupe des *Oléfines* qui comprend l'éthylène, le propylène, le butadiène et le butylène.
(b) le groupe des *Aromatiques* qui comprend le benzène, le toluène et le xylène (ce groupe est connu dans l'industrie du pétrole sous l'appellation « BTX »).

Ces hydrocarbures sont produits lors du raffinage du pétrole et le craquage du naphte. À partir du gaz naturel, on obtient principalement de l'éthylène, mais aussi de petites quantités de propylène et d'autres produits non-aromatiques. On ne peut pas obtenir le groupe

des aromatiques à partir du gaz naturel. Donc, l'approvisionnement en pétrole s'impose pour la fabrication de toute la gamme de produits plastiques, puisque certaines résines ne peuvent être synthétisées qu'à partir des aromatiques comme le démontre le schéma de la Figure 1, [2, 3].



Légende

PE : polyéthylène
PVC : polychlorure de vinyle
PVAc : polyvinyl acetate
EVA : copolymère d'éthylène acétate de vinyle
PU : polyuréthanne
PP : polypropylène
PMMA : polyméthacrylate de méthyle
SAN : copolymère de styrène-acrylonitrile
ABS : terpolymère d'acrylonitrile-butadiène-styrène
SBR : Caoutchouc de styrène-butadiène
PS : polystyrène
PC : polycarbonate
PET : polytéréphtalate d'éthylène
PBT : polytéréphtalate de butylène

Figure 1

Les principaux thermoplastiques : caractéristiques générales et applications

Une des raisons importantes qui justifie l'emploi grandissant des plastiques dans les équipements de sport est la variété croissante des résines offertes aujourd'hui, qui présente aux mouleurs et designers un choix plus vaste de caractéristiques utiles, dont les combinaisons n'attendent qu'à être mises à profit.

Le nombre de matériaux thermoplastiques actuellement disponibles sur le marché dépasse la trentaine. Pourtant, on peut classer arbitrairement ces matériaux en deux groupes d'après leurs caractéristiques de performance et surtout d'après leur consommation. Dans le premier groupe, se classent les plastiques à usage général, de grande consommation, et ceux qu'on appelle communément les plastiques à gros tonnage (« commodity resins »). Les thermoplastiques désignés sous ce terme comprennent le polyéthylène, le polypropylène, le PVC, le polystyrène et l'ABS. Ceux-ci représentent à eux seuls environ 75% du tonnage de matières plastiques vendues sur le marché américain. On les utilise dans une multitude de secteurs dont l'emballage, le bâtiment, l'automobile, le domaine des sports et loisirs, les tuyaux et profilés, et le domaine des appareils ménagers. Ils se caractérisent par un bon rapport performance/coût et sont faciles à façonner dans diverses formes même complexes.

Le second groupe comprend les matières plastiques de très haute performance et dont l'usage est plutôt spécialisé. Ces matériaux sont connus sous le nom de « *plastiques industriels* », puisqu'ils rivalisent et ont souvent remplacé les métaux dans plusieurs secteurs d'applications industrielles (automobile, aéronautique). Ils possèdent une excellente combinaison de rigidité et de résistance à la traction et aux chocs, une bonne tenue à la chaleur, une inertie chimique et une excellente stabilité dimensionnelle, ce qui en fait des matériaux de choix pour la fabrication des pièces de précision, les roues dentées par exemple, et les engrenages. Parmi les plastiques industriels, on peut citer la famille des polyamides (nylons), les acétals, les polyesters thermoplastiques (PET), les acryliques, les fluorocarbones (comme le « Teflon »), le polycarbonate, les polyuréthannes, le polyoxide de phénylène, le polysulfure de phénylène, et bien d'autres.

Bien qu'ils soient généralement dispendieux, les plastiques industriels offrent au concepteur un rapport performance/coût sensiblement amélioré et font concurrence aux métaux dans bien des domaines. Le Tableau I présente certaines caractéristiques et utilisations typiques des principaux thermoplastiques.

Techniques de mise en œuvre

La mise en œuvre des thermoplastiques s'effectue en trois étapes :

1. chauffage du matériau brut (sous forme de granulé ou de poudre) au-dessus de son point de fusion jusqu'à l'état liquide (« coulée »),
2. formage de la coulée en la passant à travers une filière ou dans l'empreinte d'un moule ayant la forme de la pièce finie,
3. refroidissement et solidification du plastique dans la configuration finale.

On distingue trois méthodes principales de transformation : moulage, extrusion, et thermoformage. Les différentes techniques de mise en œuvre sont brièvement décrites ci-dessous.

Moulage par injection

Le moulage par injection est un procédé cyclique. Il consiste à faire fondre le matériel plastique à l'intérieur d'un cylindre chauffé, muni d'une vis rotative dotée d'un mouvement de va-et-vient. La vis en translation force la coulée à l'intérieur de la cavité du moule.

TABLEAU I

Caractéristiques et utilisations typiques de quelques thermoplastiques

Plastique	Caractéristiques	Utilisations typiques
ABS	résistance aux chocs, résistance à la traction, stabilité dimensionnelle, rigidité, facilité de moulage	produits électroménagers
Acétals	rigidité, résilience, résistance au fluage et à l'usure, stabilité dimensionnelle dans une ambiance hostile, (température, humidité, solvants), faible coefficient de friction	fixations de ski
Acryliques	transparence, transmission excellente de la lumière, résistance aux intempéries, stabilité de la couleur, rigidité	bibelots, articles de cuisine
EVA	grande flexibilité, ténacité aux basses températures, résistance à la fissuration sous effort, facilité de moulage	
Fluorocarbones	très faible coefficient de friction, surface non adhérente, ténacité aux basses températures, inertie chimique	produits industriels (robinets, câbles)
Ionomètres	ténacité, résistance aux chocs à basse température, résistance à l'abrasion, flexibilité, résilience, transparence	
Nylons	ténacité, résilience, résistance à l'abrasion, faible coefficient de friction, résistance aux hautes et basses températures, résistances à l'essence et aux huiles	articles de sport
Polycarbonates	grande résistance aux chocs, rigidité, résistance aux températures basses et hautes, stabilité dimensionnelle, résistance au fluage, transparence	pare-chocs d'automobile, articles électroménagers, vitres, phares
Polyéthylènes	résistance aux chocs, ténacité aux basses températures, gamme de raideur, scellables à la chaleur, légèreté, résistance à l'essence, facilité de moulage, faible coût	câbles de téléphone
Polypropylènes	dureté, rigidité, résistance à la température, résistance à la fissuration due aux efforts, légèreté	électroménager
PVC	rigide ou plastifié, peut être composé pour donner une grande variété de propriétés physiques	revêtement extérieur

Là, le matériel est solifié et refroidi ; le moule se sépare et la pièce est éjectée à l'aide d'un mécanisme. Puis le moule se referme et le cycle se répète.

Cette méthode de moulage est idéale, elle est l'une des plus économiques pour la production en série de pièces de précision ayant des formes compliquées. Ordinairement, à la sortie du moule, la pièce est un produit fini et prêt pour l'utilisation. Le pourcentage de perte est minime. Les rebuts qui sont détachés du produit fini peuvent être recyclés après leur broyage. La fabrication du moule, cependant, est dispendieuse.

Le moulage par injection s'emploie dans la fabrication de bacs de manutention, des seaux, des roues d'engrenage, des accessoires d'automobiles, etc. La plupart des thermoplastiques se prêtent facilement au moulage par injection.

Moulage par soufflage

Le procédé de moulage par extrusion-soufflage est utilisé pour la fabrication des corps creux et des bouteilles, d'épaisseur uniforme. Le cycle de moulage consiste à faire fondre la résine dans un cylindre chauffé muni d'une vis rotative rétractable et qui pousse le plastique liquide à travers une filière annulaire. Un tube d'une certaine longueur, la paraison, est ainsi formé. La paraison est déposée dans le moule, ensuite soufflée par de l'air comprimé qui la refoule sur les parois intérieures du moule. Le matériau prend la forme du moule et il est refroidi. Le moule se sépare, le produit fini est éjecté, et le cycle recommence.

Moulage par rotation

Le procédé de roto-moulage est utilisé pour la fabrication des corps creux, plutôt volumineux, dont les parois sont d'une épaisseur uniforme et sans jointures. Les cadences de moulage sont relativement plus lentes que pour les procédés décrits plus haut.

Le cycle consiste à charger le moule, à froid, de la quantité de résine en poudre nécessaire pour former la pièce finale. Le moule, en rotation sur deux axes croisés, est chauffé lentement pendant que la résine fond contre les parois intérieures du moule, formant ainsi une couche d'une épaisseur uniforme selon la forme du moule. Sans arrêter la rotation, le moule est ensuite refroidi. Quand le plastique s'est solidifié, la rotation est arrêtée, le moule s'ouvre et la pièce finie est éjectée.

Exemples de produits rotomoulés : fosse septique, réservoir d'emmagasinage, chaloupes, canots, etc.

Extrusion

Contrairement aux techniques de moulage qui sont cycliques, l'extrusion est un procédé continu utilisé pour former des tubes, des baguettes, des filaments, des films, des feuilles, et une grande variété de profilés. On se sert aussi de l'extrusion pour le compoundage des résines avec différents additifs (lubrifiants, colorants, fibres, particules minérales, etc.).

Dans ce procédé, le plastique est déposé à travers une trémie dans un cylindre chauffé et équipé d'une vis pour transporter, comprimer, mélanger et fondre le matériel. La vis en rotation transporte le plastique li-

quide à travers les orifices d'une filière où il prend la forme désirée. L'extrudat est dirigé de la filière dans une zone où il est refroidi. Dans la production des films très minces (pellicule) utilisés pour l'emballage, l'extrusion est réalisée sous une filière annulaire pour former un tube qui ensuite est soufflé en forme de gaine (ou « bulle »). Dans l'extrusion des feuilles, une filière plate est utilisée.

Thermoformage

Le thermoformage est l'un des procédés les plus anciens pour la transformation des matières plastiques. Il consiste à chauffer une feuille thermoplastique et à forcer le matériel chaud et flexible à prendre la forme d'un moule à l'aide d'une pression d'air, ou d'un poinçon, tandis qu'un vide s'exerce de l'autre côté, entre le matériel et le moule. Le plastique est aspiré et maintenu contre les parois du moule jusqu'à solidification.

Le procédé de thermoformage s'emploie dans la fabrication de plateaux, boîtes, portes de réfrigérateur, objets évidés, etc. L'ABS, le polystyrène et le PVC sont les plus utilisés dans le thermoformage. L'installation de thermoformage en ligne comporte une extrudeuse produisant la feuille qui alimente continuellement la machine à thermoformer.

Les thermoplastiques renforcés

L'incorporation de fibre de verre ou de carbone renforce le matériau thermoplastique et lui confère des propriétés améliorées : résistance mécanique accrue, rigidité supérieure, haute température de fléchissement sous contrainte, et une meilleure résistance au fluage surtout à des températures élevées.

Les graphiques des figures 2 et 3 comparent les modules de flexion et les températures de déformation à chaud de l'homopolymère d'acétal, du nylon-6,6, du nylon-6,6, renforcé de 33% de fibre de verre et du polyamide renforcé de 40% de matières minérales. On y indique aussi, pour fins de comparaison, les propriétés caractéristiques d'un polyéthylène de haute densité. La figure 4 compare les courbes contrainte/déformation pour l'homopolymère d'acétal, le nylon-6,6, le nylon renforcé de 33% de fibre de verre et le polyéthylène de haute densité. La pente plus raide de la courbe de nylon chargé de fibre de verre indique une rigidité plus grande et une résistance de la traction supérieure. Cependant, l'allongement à la rupture du nylon renforcé est inférieure à celles des autres matériaux non-chargés, ceux-ci étant plus souples et possèdant une ductilité supérieure.

L'addition de particules minérales telles que le talc, le carbonate de calcium, ou le mica, réduit le volume de la résine utilisée dans la pièce finie. De plus, dans le cas des polymères cristallins, les particules minérales contribuent à amorcer la cristallisation, ce qui réduit le temps de solidification de la pièce moulée et, en raison de sa grande rigidité aux températures élevées, permet une éjection rapide du moule et en conséquence raccourci le temps du cycle. Cependant, les propriétés abrasives des fibres de verre et de certaines particules minérales causent une usure de la machine lors de la mise en œuvre de ces matériaux. Le degré d'usure dépend bien sûr de la nature et de la quantité de la char-

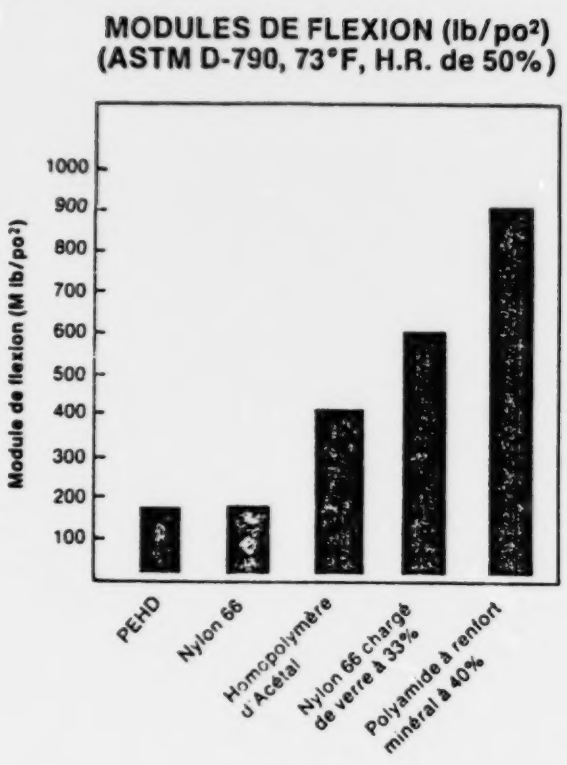


Figure 2

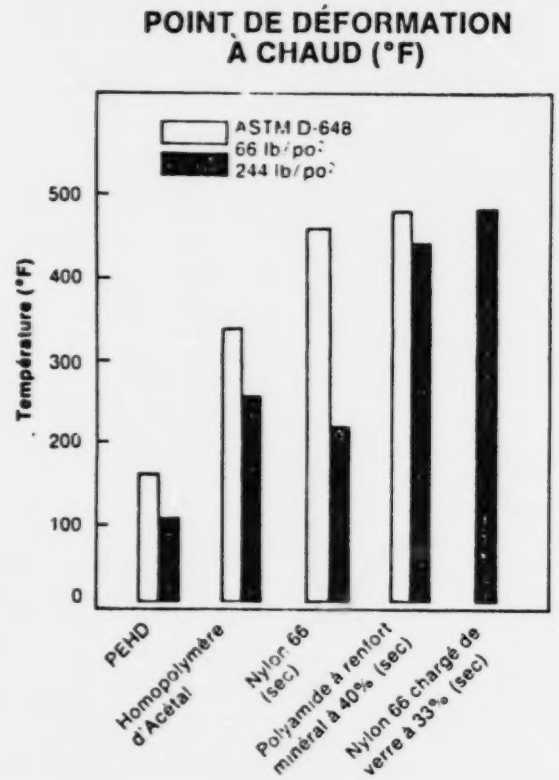


Figure 3

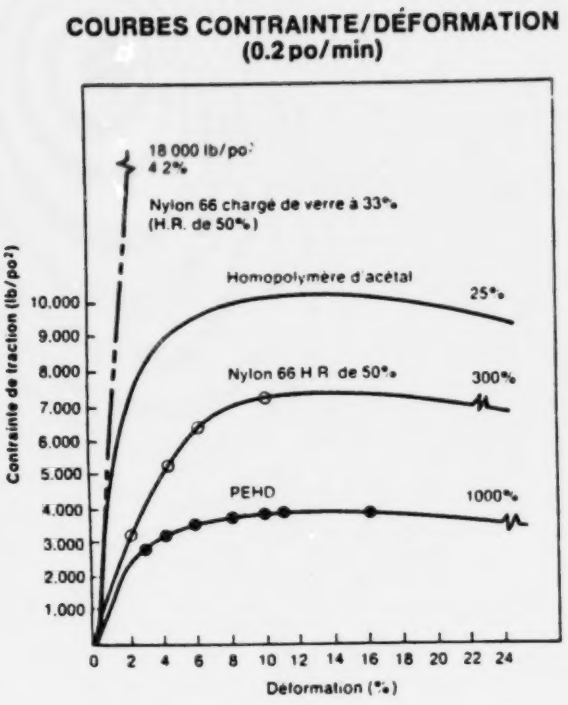
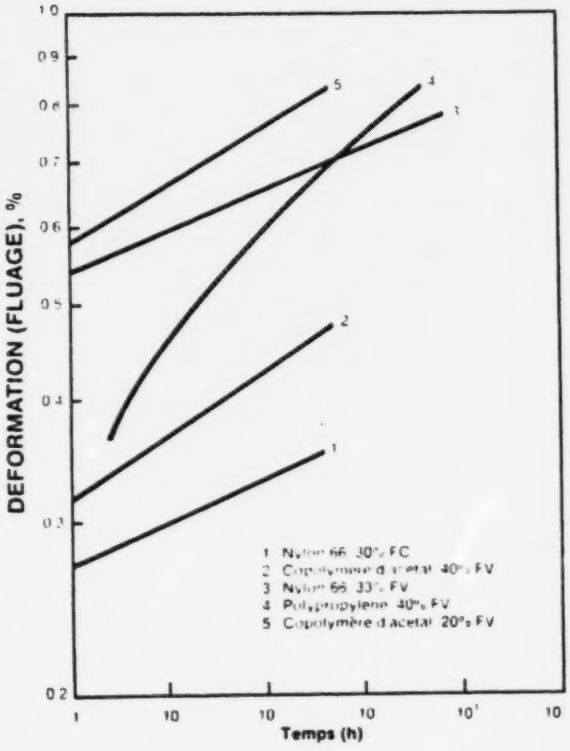


Figure 4



Courbes de fluage typiques de certains thermoplastiques armés
Température 22 C. Contrainte 4000 lb po²
FV fibres de verre. FC fibres de carbone
Source Plastics Design Forum, Sept Oct 1979

Figure 5

ge. Pour qu'elles agissent comme renforcement du plastique, il faut s'assurer que les particules minérales soient bien dispersées dans la résine et qu'il existe une liaison chimique entre les chaînes polymériques et les particules minérales de la charge, ce qui améliore notablement les caractéristiques mécaniques (traction, choc) et la rigidité du produit. En effet, faute de ces deux conditions, l'addition d'une charge minérale à certaines résines thermoplastiques peut détériorer leurs propriétés mécaniques et particulièrement la résistance au choc.

Les thermoplastiques se déforment lentement sous l'effet de contraintes prolongées. Ceci est appellé « fluage ». L'importance de la déformation augmente avec l'effort imposé, le temps d'application et la température. Le renforcement de la résine augmente sa résistance au fluage. Le graphique de la figure 5 compare les caractéristiques de fluage de certains plastiques renforcés.

Grâce à leur rigidité et leur résistance au fluage à des températures élevées ainsi qu'à leur stabilité dimensionnelle, les thermoplastiques renforcés sont des matériaux de choix pour la fabrication de plusieurs pièces d'automobiles, ventilateurs de moteurs, carters de tronçonneuses et d'outils électriques, articles de sports, roues d'engrenage, etc.

Les plastiques et l'automobile

L'automobile continue d'assurer des débouchés importants et réguliers aux plastiques. Ce secteur industriel se rend compte de plus en plus de l'importance que peut prendre l'utilisation des plastiques dans la réalisation de ses objectifs : économie d'énergie, sécurité et confort, allègement et réduction des coûts. La croissance de l'usage des plastiques dans l'automobile fut remarquable. Par exemple, en 1960, la voiture américaine moyenne n'employait même pas 10 kg de plastiques de tout type. Cette année, on en trouvera en moyenne plus que 100 kg par véhicule. Jetons un coup d'œil rapide sur les principales raisons de cette évolution.

Le grand choix de plastiques : des innovations

Ces matériaux synthétiques ont permis des innovations originales en regard des exigences actuelles autant en matière d'allègement que de sécurité ou d'esthétique. Avec l'abondance de l'information technique disponible et l'innovation que les fournisseurs apportent en introduisant de nouveaux types de plastiques, le concepteur de l'automobile peut profiter de ces matériaux pour remplir des fonctions que d'autres matériaux ne pourraient remplir économiquement. Comme on peut le voir au tableau II, la vaste gamme des plastiques disponibles comprend presque tous les types principaux de plastiques sur le marché. L'assortiment des plastiques grandit constamment, tant par l'apparition de nouveaux matériaux que par une amélioration de ceux qui existent. Un bon exemple de ceci est le nouveau nylon super robuste « Zytel » ST de Du Pont qu'on utilise pour les mécanismes de démarrage et pour les engrenages soumis aux chocs violents. Les plastiques renforcés et les alliages polymériques s'imposent de plus en plus. Par un choix judicieux des

composants, on peut mettre au point un mélange, ou un alliage, dont les propriétés sont stables et intermédiaires entre celles des matériaux de départ. Par exemple, on trouve des alliages d'ABS et de polycarbonate, polypropylène – EPDM modifié, PVC/ABS, PVC/acrylique, [4,5].

Des économies possibles avec les plastiques

Ajouté à la disponibilité, à la qualité et à la variété des plastiques, le facteur économie joue un rôle important pour le concepteur de l'industrie automobile. À volume égal, le coût de plusieurs variétés de plastique brut est moindre que celui des métaux utilisés couramment comme le zinc, l'aluminium et le laiton, (voir figure 6). Vis-à-vis l'acier généralement moins coûteux, des avantages techniques sont nécessaires toutefois pour que l'usage des plastiques soit envisagé.

À cet égard, le plus grand potentiel d'économie des plastiques provient de la possibilité de remplacer une douzaine ou plus de pièces métalliques par une seule pièce de plastique moulé et arriver ainsi à des économies considérables de fabrication et d'assemblage. Les sièges, par exemple, constituent un montage très complexe qui requiert beaucoup de pièces et de main-d'œuvre. Si l'on peut fabriquer un bon siège en moulant le cadre et en coulant le coussin en plastique, le facteur coût favorisera ce matériau.

Un autre domaine où les plastiques peuvent amener des économies, c'est celui des méthodes de fabrication, comme le moulage par injection qui peut donner des pièces compliquées sous de faibles tolérances et habituellement prêtes à l'usage à la sortie du moule. De même, dans bien des cas les propriétés des plastiques permettent des méthodes de montage peu coûteuses comme les assemblages à pression, la soudure par rotation, le rivetage à froid, les filets moulés et les vis autotaraudeuses.

Réduction de poids

Les matières plastiques, même renforcées ou chargées, sont plus légères que le verre ou les métaux. Le coût sans cesse croissant du carburant a lourdement pesé sur la conception et les méthodes de fabrication des automobiles. Les impératifs de réduction de coût et de poids se sont traduits par une utilisation accrue des matières plastiques de haute performance dont le rapport propriétés/poids surpasse celui de plusieurs métaux.

TABLEAU II

Principaux usages des plastiques dans l'automobile

Plastiques	Usages
ABS	Calandres, tableaux de bord, revêtements intérieurs, enjoliveurs de roues.
Acrylique	Lentilles, écussons
Acétal	Bouchons de réservoirs, quincaillerie diverse, pièces sous le capot
Nylon	Ferrures intérieures, allonges d'ailes, pièces sous le capot, chatons, douilles électriques
Ionomère	Bandes et butées de pare-chocs, bandes protectrices de carrosserie, boutons de manivelle de fenêtre
Polycarbonate	Pare-chocs, phares
Polyéthylène	Bouteilles de liquide réfrigérant, réservoirs d'essence, moulures diverses, isolation des fils, panneaux de bavolet, bavettes, bâtis d'accumulateur
Polypropylène	Panneaux et moulures intérieurs, conduits, garnitures d'ailes, bâtis d'accumulateur, enveloppes de ventilateurs, logements pour le chauffage et la climatisation, cadres de siège
Polyester, thermodurcissable	Bouts avant, allonges d'ailes, logements pour le chauffage et la climatisation, prises d'air, ailerons, certains revêtements de couvercles et de portes, pièces de châssis
Polyester,	Bavolets, allonges d'ailes.
Thermo plastique	système d'allumage, ferrures intérieures, divers appareils électriques
Phénolplaste	Pièces d'allumage et d'électricité, pièces pour freins et transmission, certaines poulies
Polyuréthanne	Sièges et rembourrage, pièces flexibles du tableau de bord et de la carrosserie, tout rembourage mousse
Feuille de résine butyral-polyvinylique	Lamellage du verre de sécurité du pare-brise
Chlorure de polyvinyle	Capitonnage, toits, panneaux et moulures intérieurs, isolation des fils

Comparaison entre les prix des alliages de coulage et ceux des plastiques industriels (1968-1986)

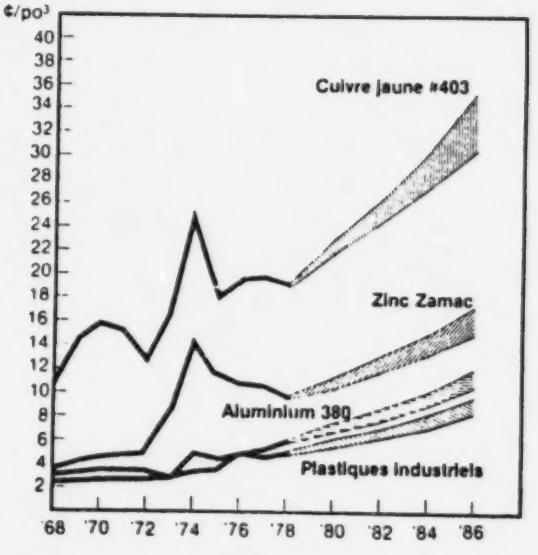


Figure 6

Sécurité et lutte contre la pollution

Plus récemment, un autre facteur de croissance des plastiques dans l'automobile a été la multitude de normes de sécurité et de pollution qui sont apparues au cours des dernières années. Avec la demande des gouvernements et des consommateurs pour des voitures plus sûres et plus propres, sont apparues pour les plastiques des débouchés qui n'existaient pas dans le passé. En voici quelques exemples : système d'entrave par verrouillage de l'allumage : systèmes d'épuration des émissions : interrupteurs électriques pour dispositifs sécuritaires et nombre d'autres.

Les plastiques sont un atout dans la conservation d'énergie

Les plastiques jouent un rôle important dans la conservation d'énergie. Comparativement aux métaux et au verre qu'elles peuvent remplacer, les matières plastiques requièrent une dépense d'énergie considérablement moindre dans leur fabrication, à volume égal du produit fini (voir figure 7). Ces calculs sont basés sur l'énergie requise depuis la production de la résine de base jusqu'à la fonte du matériau et la fabrication de la pièce.

Dans le contexte de la conservation d'énergie, il est à propos de mentionner certains facteurs favorisant les plastiques au détriment des métaux. En voici quelques-uns :

- La valeur d'utilisation du pétrole et du gaz naturel, évaluée en BTU, est supérieure comme plastique que comme combustible.
- Les plastiques peuvent donner une double vie au pétrole : d'abord sous forme de produit, puis comme combustible. Lorsqu'on incinère les plastiques pour en tirer de l'énergie, ils produisent plus de BTU que n'importe quel autre matériau trouvé dans les rebuts municipaux (valeur calorifique environ trois fois supérieure à n'importe quelle autre matière organique présente dans les déchets).

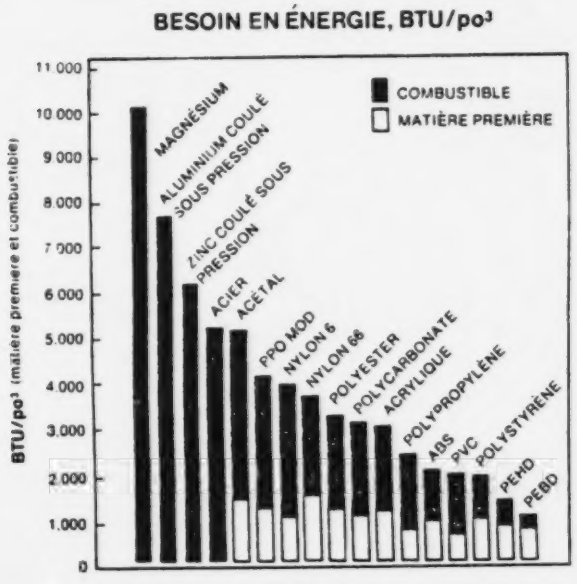


Figure 7

Conclusions et perspectives d'avenir

Tout bien considéré, on peut prévoir un accroissement constant de l'usage des plastiques dans l'industrie de l'automobile. Avec l'économie et la réduction de poids comme première préoccupation dans le design actuel, l'utilisation des plastiques de tous genres continuera d'augmenter. La voiture de l'avenir sera moins coûteuse, plus sûre, plus légère et plus sobre : c'est dans ces domaines que les plastiques peuvent apporter leur plus grande contribution.

Les plastiques de mousse structurale et les plastiques renforcés font fureur dans les secteur du bâtiment et de l'automobile détenus traditionnellement par les métaux, le béton et le bois.

La recherche de nouvelles résines synthétiques, l'introduction de nouveaux alliages polymériques ont contribué à élargir la gamme des applications possibles, ainsi que l'apparition de nouvelles techniques de mise en œuvre : thermoformage à phase solide, moulage par injection-soufflage, coextrusion et coinjection.

Dans les années à venir, l'accent portera sur la conservation de l'énergie et un accroissement de la productivité. L'utilisation du microprocesseur et de la logique électronique va apporter aux fabricants un moyen d'améliorer leur compétitivité par une meilleure rentabilité.

Le règne des automatismes va s'imposer.

Notre économie de croissance et de changement doit s'appuyer davantage sur les plastiques dans l'avenir parce que les matériaux dits « naturels » sont, presque sans exception, épuisables. De plus, notre technologie exige sans cesse des matériaux plus performants et seuls les plastiques ont la versatilité et la facilité de mise en œuvre requises.

RÉFÉRENCES

1. DOUGLAS, J., *Energy — The 1979 Perspective*, First Annual Canadian Outlook Conference on Resin Supply and Demand, Toronto, November 15, 1979.
2. WITHERS, B.G.S., *Inter relationships of Feedstocks*, First Annual Canadian Conference on Resin Supply and Demand, Toronto, November 15, 1979.
3. HARPER, C.A., Ed., *Handbook of Plastics and Elastomers*, Mc Grw Hill, 1975, Ch.1, p. 8.
4. FOUNTAS, N., *Plastics World*, p. 56, November 1977.
5. *Modern Plastics*, p. 42, November 1977.
6. *Parlons Plastiques*, Bulletins de nouvelles sur les plastiques, Division des produits plastiques, Du Pont Canada Inc.
7. DIXON, R.R., *Plastics Design Forum*, Vol. 5, No. 4, p. 15, 1979.

Classement des différentes matières plastiques suivant leurs propriétés*:

Annexe 1 : Masse volumique

Annexe 2 : Résistance à la compression

Annexe 3 : Résistance à la rupture par traction

Annexe 4 : Résistance à la flexion

Annexe 5 : Résistance à la rupture par choc

Annexe 6 : Dureté Rockwell

Annexe 7 : Température de fléchissement sous charge

Annexe 8 : Résistance à la chaleur continue

Annexe 9 : Chaleur spécifique

Annexe 10 : Conductibilité thermique

Annexe 11 : Rigidité diélectrique

Annexe 12 : Indice de réfraction

Annexe 13 : Transmission de la lumière

Annexe 14 : Absorption d'eau

*d'après les normes américaines ASTM

ANNEXE N° 1

MASSE VOLUMIQUE

(Densité) g/cm² (ASTM-D 792)

0,83	Poly-méthylpentène
0,896-0,899	Copolymère éthylène-propylène
0,902-0,91	Polypropylène
0,91-0,915	Polybutylène
0,91-0,925	Polyéthylène basse densité
0,92-0,95	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
0,93-0,96	Ionomères
0,941-0,965	Polyéthylène haute densité
0,93-1,1	Coolymère styrène-butadiène
0,99-1,5	Silicones
1,01-1,02	Polyamide 12
1,01-1,06	ABS
1,01-1,46	Polyesters coulés
1,03-1,05	Polyamide 11
1,04-1,09	Polystyrène « chaleur »
1,04-1,10	Polystyrène « choc »
1,05-1,24	Polypropylène/fibres de verre
1,05-1,25	Polyuréthane linéaire
1,06-1,08	Polyamide 6/12
1,06-1,10	Poly-oxyde de phénylène
1,07-1,09	Polyamide 6/10
1,075-1,1	Acrylonitrile-styrène
1,09	Copolymère méthacrylate de méthyle-styrène
1,09-1,17	Ethylcellulose
1,11-1,4	Résines époxydes
1,12-1,14	Polyamide 6
1,13-1,15	Polyamide 66
1,15-1,22	Acétobutyrate de cellulose
1,16-1,35	PVC plastifié.
1,17-1,20	Polyméthacrylate de méthyle
1,17-1,24	Propionate de cellulose
1,2	Polycarbonate
1,2-1,33	Polystyrène/20-30 % fibres de verre
1,2-1,46	AS/20-30 % fibres de verre
1,22-1,34	Acétate de cellulose moulé
1,23	Polyamide 12/30 % fibres de verre
1,23-1,36	ABS/20-40 % fibres de verre
1,24-1,52	Polycarbonate/10-40 % fibres de verre
1,34	Polysulfone
1,25-1,3	Phénol-formol non chargé
1,28-1,32	Acétate de cellulose feuilles
1,3-1,4	Carbonate d'allyldiglycol
1,3-1,58	Chlorure de polyvinyle rigide
1,31-1,38	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
	Polyamide 6/12/30-35 % fibres de verre
	Polyester linéaire
1,34	Sulfures de polyphénylène non chargés
1,34-1,45	Phénol-formol/farine de bois
1,35	Chlorure de polyvinyle/ABS
1,35-1,40	Celluloid
1,35-1,42	Polyamide 6/30-35 % fibres de verre
1,35-2,3	Polyesters/fibres de verre
1,38	Polyamide 66/ 33 % fibres de verre
1,41	Polyamide-imide non chargée
1,41-1,42	Polyacétal
1,43-1,51	Poly-imides
1,45-1,52	Mélamine-formol
1,47-1,52	Urée-formol/cellulose alpha
1,5-1,7	Mélamine formol/phénol-formol
1,51 1,78	Phtalate de diallyle/fibres de verre
1,52	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
1,56	Polyacétal/20 % fibres de verre
1,6-2	Résines époxydes/fibres de verre
1,64	Sulfures de polyphénylène/fibres de verre
1,65-1,72	Chlorure de polyvinylidène
1,69-1,95	Phénol-formol/fibres de verre
1,75	Résines de furane
1,75-1,78	Polyfluorure de vinylidène
1,8-1,9	Silicones/fibres de verre
1,8-2	Mélamine-formol/fibres de verre
1,9	Poly-imides/fibres de verre
2,1-2,2	Polychlorotrifluoroéthylène
2,12-2,15	Résines alkydes/fibres de verre
2,12-2,17	Ethylène-propylène fluoré
2,14-2,2	Polytétrafluoroéthylène

ANNEXE N° 2

RESISTANCE A LA COMPRESSION

kg/mm² (ASTM-D 695)

2810-3160	Mélamine-formol
2460	Polyamide-imide non chargée
2285	Polyimides/fibres de verre
2065	Polyamide 66/ 33 % de fibres de verre
1830-2110	Mélamine-formol/phénol-formol
1760-3160	Urée-formol moulé
1760-2810	Résines époxydes/fibres de verre
1760-2460	Phtalate de diallyle/fibres de verre
1690	Poly-imides
1545-2530	Phénol-formol/farine de bois
1545-2460	Celluloïd
1545	AS/20-33 % fibres de verre
1475-1620	Carbonate allyldiglycol
1405	Polyuréthanes élastomères
1335	Polyamide 6/30-35 % fibres de verre
1265-1650	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
1265	Polyacétal
	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
1125-1155	Poly-oxyde de phénylène
1055-3515	Polyesters/fibres de verre
1055-2250	Résines alkydes/fibres de verre
1055-1760	Résines époxydes non chargées
1055	Polyamide 66
984-1195	Acrylonitrile-styrène
975	Poly-sulfone
950-1265	Polystyrène/20-30 % fibres de verre
915-2110	Polyesters coulés
915-1475	Polycarbonate/10 à 40 % fibres de verre
915	Polyamide 6
880	Polycarbonate
845-1550	ABS/20-40 % fibres de verre
845-1055	Phénol-formol coulé sans charge
810-1125	Polystyrène
775-1335	Polyméthacrylate de méthyle
775-1055	Copolymère méthacrylate de méthyle/styrène
705-2460	Ethylcellulose
705-2110	Phénol-formol non chargé
705-1055	Silicones moulées
705-915	Résines de furane
610	Fluorure de polyvinylidène
605-1020	Polytéréphtalate d'éthylène
560-915	Chlorure de polyvinyle rigide
505-705	ABS « chaleur »
385-560	Polypropylène
365-720	ABS extrusion
325-520	Polychlorotrifluoroéthyiène
315-560	ABS « choc »
280-630	Polystyrène « choc »
190-250	Polyéthylène haute densité
170-1545	Propionate de cellulose
155	Ethylène-propylène fluoré
150-1545	Acétobutyrate de cellulose
140-2530	Acétate de cellulose
140-190	Chlorure de polyvinylidène
120	Polytétrafluoroéthylène
65-120	Chlorure de polyvinyle plastifié
7	Silicones coulées

ANNEXE N° 3

RESISTANCE A LA RUPTURE PAR TRACTION

kg/mm², vitesse de traction 100 mm/mn (ASTM-D 638, D 651)

3515	Polyesters/fibres de verre (maximum)
1900	Poly-imides/fibres de verre
1545	Polyamide 6/12/30-35 % fibres de verre
1405	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
1335	Polyamide 6/30-35 % fibres de verre
1225	Polyamide 12/30 % fibres de verre
1195-1335	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
1019-1195	Polyoxyde de phénylène/20-30 % de fibres de verre
935	Polyamide-imide
845-1759	Polycarbonate/10-40 % fibres de verre
810	Polyamide 66
765	Polyamide 6
720	Polysulfone
705-1405	Résines époxydes/Fibres de verre
705	Sulfures de polyphénylène
	Polyacétal
	Méthacrylate de méthyle-styrène
630-915	Poly-imides
630-845	Acrylonitrile-styrène
620	Polyamide 6/12
600-1405	Acrylonitrile-styrène/20-33 % fibres de verre
600-1335	ABS/20-40 % fibres de verre
600-775	Polyacétal/20 % fibres de verre
575	Polytéréphtalate d'éthylène
560-775	Polyméthacrylate de méthyle
560-670	Polycarbonate
560-650	Polyamide 12
560	Polyamide 11
550-675	Polyoxyde de phénylène
550	Polyamide 6/10
490-915	Mélamine-formol/alpha-cellulose
490-560	Celluloid
420-1019	Polypropylène/fibres de verre
420-915	Polyesters coulés
420-775	Phtalate de diallyle/fibres de verre
420-560	Mélamine-formol/phénol-formol
420-530	Chlorure de polyvinyle rigide
390-915	Urée-formol
380-490	Chlorure de polyvinyle/ABS
350-840	Polystyrène
350-630	Phénol-formol/farine de bois
350-420	Carbonate d'allyl-diglycol
315-590	Polyuréthane élastomère
315-560	Acétate de cellulose (feuilles)
315-530	ABS « Choc » moulé
315-420	Polychlorotrifluoroéthylène
300-390	Polypropylène
280-915	Résines époxydes coulées
280-670	Résines alkydes/fibres de verre
280-660	Silicones/fibres de verre
280-490	ABS extrusion
265-310	Polybutylène
245-350	Ionomères
245-280	Polyméthylpentène
240-280	Butadiène-styrène
215-385	Polyéthylène haute densité
210 à 3515	Polyesters/fibres de verre (selon structure)
210-350	Chlorure de polyvinylidène
210-315	Résines de furane
190-220	Ethylène-propylène fluoré
185-485	Acétobutyrate de cellulose
175	Polyamide 66/33 % fibres de verre
140-560	Ethylcellulose
140-550	Propionate de cellulose
140-350	Polytétrafluoroéthylène
135-630	Acétate de cellulose moulé
100-245	Chlorure de polyvinyle plastifié
100-200	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
45-160	Polyéthylène basse densité
40-520	Fluorure de polyvinylidène

ANNEXE N° 4
RESISTANCE A LA FLEXION
kg/mm² (ASTM-D 790)

5625	Polyesters/fibres de verre (maximum)
3480	Poly-imides/fibres de verre
2880	Polyamide 66/ 33 % fibres de verre (à sec)
1830	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
1685	Polyamide 6/ 30-35 % fibres de verre
1645	Polyamide-imide non chargée
1620	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
1570	Polyamide 12/ 30 % fibres de verre
1545-1830	Acrylonitrile-styrène/fibres de verre
1300-1405	Poly-oxyde de phénylène/20-30 % fibres de verre
1195-2250	Polycarbonate/10-40 % fibres de verre
1195	Polyamide 66 (à sec)
1125-1335	Méthacrylate de méthyle-styrène
1080	Polysulfones
1055-1195	Résines alkydes/fibres de verre
990	Poly-acétal
950	Poly-carbonate
935-1475	Résines époxydes coulées
915-1335	Polyméthacrylate de méthyle moulé
900-950	Poly-oxyde de phénylène
845-1195	Polyméthacrylate de méthyle coulé
845-1175	Polytéréphtalate d'éthylène
775-1755	Phtalate de diallyle/fibres de verre
775-1195	Phénol-formol coulé
740-1400	Polystyrène/20-30 % fibres de verre
705-4220	Résines epoxydes fibres de verre
705-1265	Résine urée-formol moulée
705-1125	Mélamine-formol/alpha cellulose
	Chlorure de polyvinyle rigide
705-985	Silicones moulées
630-775	Celluloïd
600-1615	Polyesters coulés
560-985	Polystyrène
560-705	Mélamine-formol/phénol-formol
525	Chlorure de polyvinyle/ABS
520-655	Polychlorotrifluoroéthylène
490-5625	Polyesters/fibres de verre (selon structure)
490-985	Phénol-formol/farine de bois
490-775	Polypropylène/fibres de verre
420-985	ABS extrusion
420-915	Carbonate d'allyl-diglycol
420-775	ABS « choc »
420-705	Acétate de cellulose (feuilles)
420-630	Résines de furane
420-560	Polypropylène
295-435	Chlorure de polyvinylidène
280-845	Ethylcellulose
280-630	Acétobutyrate de cellulose (feuilles)
210-845	Polystyrène « choc »
205-800	Propionate de cellulose
140-1125	Acétate de cellulose moulé
125-655	Acétobutyrate de cellulose moulé
50-630	Polyuréthane élastomère

ANNEXE N° 5

RESISTANCE A LA RUPTURE PAR CHOC

(Eprouvettes entaillées) kg.cm/cm² (ASTM-D 256)

Ne cassent pas :	Polyéthylène basse densité
	Co-polymère éthylène-acétate de vinyle
	Polybutylène
	Ethylène-propylène fluoré
	Polyuréthane linéaire
165	Polyesters/fibres de verre (maximum)
65-100	Polycarbonate
27-38	Celluloid
27	Poly-oxyde de phénylène
25-42	ABS « choc »
21-75	Ionomères
18,5	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
16-81	Chlorure de polyvinyle/ABS
16	Polytétrafluoroéthylène
	Polyamide 6/30-35 % fibres de verre
	Polyamide 12/30 % fibres de verre
15-20	Fluorure de polyvinylidène
14	Polyamide 6/12
13,6-54	ABS « extrusion »
12,5	Polyoxyde de phénylène/20-30 % fibres de verre
12-15	Polychlorotrifluoroéthylène
12	Polyamide 66/33 % fibres de verre (à sec)
11-163	Résines époxydes/fibres de verre (selon structure)
10-40	Ethylcellulose
10-30	Polyamide 12
10	Polyacétal/25 % fibres de verre
9,8	Polyamide 11
8-163	Polyesters/fibres de verre (selon structure)
7-12	Polyacétal
7-8,7	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
7	Polysulfone
6,5-22	Polycarbonate/10 à 40 % fibres de verre
6,5	Polyamide 6/10
5,5-14	ABS/20-40 % fibres de verre
5,4-7	Polyamide 6/12
5,4	Polyamide 66 (à sec)
	Polyamide 6 (à sec)
	Polyamide-imide
4,8	Polyacétal/20 % fibres de verre
4,3-34	Acétobutyrate de cellulose
4,3-5,4	Polytéréphtalate d'éthylène
3,2-54	Résines alkydes/fibres de verre (selon structure)
2,5-100	Polyéthylène haute densité (selon grade)
2,5-55	Propionate de cellulose
2,5-11	Polypropylène
2,5-10	Polystyrène « choc »
2,5-5	Poly-imides
2,2-108	Chlorure de polyvinyle rigide
2,2-82	Phtalate d'allyle/fibres de verre
2,2-8,7	Polyméthylpentène
2,2-4,4	Acrylonitrile-styrène/20-33 % fibres de verre
2-25	Acétate de cellulose moulé
2-20	Polystyrène/20-30 % fibres de verre
1,9-2,7	Acrylonitrile-styrène
1,6-43	Silicones/fibres de verre
1,6-5,4	Chlorure de polyvinylidène
1,6-2,7	Polyméthacrylate de méthyle moulé
1,5-2,2	Polyméthacrylate de méthyle coulé
1,5-2,1	Mélamine formol/phénol-formol
1,5	Sulfures de polyphénylène
1,4-2,2	Urée-formol
1,3-3,3	Phénol-formol/farine de bois
1,3-2,2	Phénol-formol coulé
1,3-1,9	Mélamine-formol/cellulose
1,1-5-5	Résines époxydes sans charge
1,1-2,3	Polyesters coulés
	Polystyrène standard
1,1	Carbonate d'allyldiglycol

ANNEXE N° 6

DURETE (ROCKWELL)

(ASTM-D 785) Echelle M-Force 100 kg, Bille de 6,35 mm Diamètre

117 (115 à 125)	Mélamine-formol/cellulose
115 (100-115)	Phénol-formol/farine de bois
115 (110-120)	Urée-formol/cellulose
110	Phtalate de diallyle/fibres de verre
102-113	Chlorure de polyvinyle/ABS
100-110	Résines époxydes/fibres de verre
100	Polyamide 66/33 % fibres de verre
	Polyamide 6/30-35 % fibres de verre
	Acrylonitrile-styrène/20-33 % fibres de verre
98	Phénol-formol/fibres de verre
95-100	Carbonate d'allyldiglycol
95	Polyméthacrylate de méthyle
94	Polyacétal
93-120	Phénol-formol coulé
92	Polystyrène/30 % fibres de verre
90	Polycarbonate/30 % fibres de verre
	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
85-105	Polyméthacrylate de méthyle moulé
85 (80-90)	Silicones/fibres de verre
83	Polyamide 66
80-90	Acrylonitrile-styrène
80-100	Résines époxydes
	Polyméthacrylate de méthyle coulé
80	Polyamide 6
79	Polyacétal/ 25 % fibres de de verre
72 (65-80)	Polystyrène
70-115	Polyesters coulés
70-78	Polycarbonate
69	Polysulfone
68-98	Polytéréphtalate d'éthylène
65-100	ABS/20-40 % fibres de verre
60 (50-65)	Chlorure de polyvinylidène
38 (10-80)	Polystyrène « choc »

Echelle E-Force 100 kg. Bille 3,18 mm diamètre

104	Polyamide-imide
80-87	Phtalate d'allyle/fibres de verre
75	Polyamides/30 % fibres de verre
40-50	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
	Polyamide 6/12/30-35 % fibres de verre
32-58	Poly-imides

Echelle R-Force 60 kg, Bille 12,7 mm diamètre

120	Polyacétal
	Polysulfone
	Polyamide 66
118	Polyamide 6
115-125	Polycarbonate
115-119	Poly-oxyde de phénylène
114	Polyamide 6/12
	Polyamide 11/fibres de verre
112	Chlorure de polyvinyle/ABS
111	Polyamide 6/10
110	Polyamide11
	Polypropylène/fibres de verre
	Résines de furane
108 (75-115)	ABS « extrusion »
106	Polyamide 12
105 (95-115)	Celluloid
100	Polyamide 6/fibres de verre
95 (80-110)	Polypropylène
90 (50-115)	Ethylcellulose
85-120	Acétate de cellulose (feuilles)
78	Chlorure de polyvinyle rigide
75-95	Polychlorotrifluoroéthylène
75 (30-100)	Polystyrène « choc »
75-105	ABS « choc »
75 (30-115)	Acétobutyrate de cellulose
73	Chlorure de polyvinyle à 16 % DOP
71	Polyméthylpentène
69 (10-122)	Propionate de cellulose
66	Copolymère éthylène-propylène
64	Polyéthylène haute densité
60	Ionomères
58	Polytétrafluoroéthylène
54	Polyéthylène basse densité
46	Chlorure de polyvinyle 26 % DOP
37	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
34-123	Acétate de cellulose moulé

ANNEXE N° 7

TEMPERATURE DE FLECHISSEMENT SOUS CHARGE

°C, sous charge de 0,0462 kg/mm² (ASTM-D 648)

477	Silicones/fibres de verre
380	Phénol-formol/fibres de verre
250	Poly-imides
245	Polyamide 66/30 % fibres de verre
210	Polyamide 6/10 : 30 % fibres de verre
	Phtalate de diallyle/fibres de verre
205	Mélamine-formol/cellulose
200	Polyamide 6/ 30 % fibres de verre
	Polyesters/fibres de verre
195	Poly-oxydes de phénylène
188	Polyamide 11/ fibres de verre
185	Polysulfone/ 30 % fibres de verre
180	Polyamide 6
177	Polysulfone
170	Polyamide 66
	Polytéréphtalate d'éthylène
165	Polyacétal/ 20 % fibres de verre
158	Polycarbonate/ 30 % fibres de verre
152	Polyamide 11
140	Polycarbonate
	Polycarbonate/ 20 % fibres de verre
138	Uree-formol/cellulose
134	Phénol-formol/farine de bois
130	Polypropylène/20 % fibres de verre
122	Polyacétal
	Polytétrafluoroéthylène
	Phénol-formol/20 % fibres de verre
	Phénol-formol coulé
116	Polypropylène
115	Polyméthylpentène
112	Polyesters coulés
105	Polyméthacrylate de méthyle
100	Polystyrène/ 30 % fibres de verre
	Polystyrène « chaleur »
93	Acrylonitrile-styrène
	Chlorure de polyvinyle/ABS
88	Polyamide 66 (minimum)
83	Polyéthylène haute densité
	Acétate de cellulose
80	Polystyrène
	ABS
	Acétobutyrate de cellulose
	Proprionate de cellulose
78	Polystyrène « choc »
75	Chlorure de polyvinyle rigide
70	Ethylcellulose
68	Celluloïd
62	Chlorure de polyvinylidène
50	Polyéthylène basse densité
40	Ionomères

ANNEXE N° 8

RESISTANCE A LA CHALEUR CONTINUE

°C (ASTM-D 257)

320		Silicones/fibres de verre
315		Polybenzimidazole
		Polybenzothiazole
288		Polyamide-imide
288	(177-288)	Phénol-formol/fibres de verre
287	(121-287)	Résines époxydes coulées
280		Poly-siloxane élastomère
260		Poly-imides
		Silicones coulées
		Polytétrafluoroéthylène
		Poly-ester triallylcyanurate
		Poly-arylsulfone
260	(205-260)	Sulfures de polyphénylène
260	(150-260)	Résines époxydes/fibres de verre
235		Polyester/amiante
232		Résines alkydes/fibres de verre
210		Ethylène-propylène fluoré
204	(148-204)	Phtalate de diallyle/fibres de verre
204	(118-204)	Mélamine-formol/amiante
199	(177-199)	Polychlorotrifluoroéthylène
177	(148-177)	Polyesters/fibres de verre
		Phénol-formol/farine de bois
177	(115-177)	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
174	149-174)	Polysulfones
167		Polyester (prémix)
165	(129-165)	Résines de furane
160	(120-160)	Polyméthylpentène
149		Fluorure de polyvinylidène
149	(121-149)	Polyamide 12/30 % fibres de verre
149	(93-149)	Polyamide 6/33 % fibres de verre
149	(93-149)	Polyamide 6/10/30 % fibres de verre
		Polyamide 6/12/30-35 % fibres de verre
149	(82-149)	Polyamide 66/33 % fibres de verre
143	(132-143)	Polypropylène
135		Polycarbonate/10-40 % fibres de verre
		Polyuréthane linéaire
129	(115-129)	Poly-oxyde de phénylène/30 % fibres de verre
121		Polyéthylène haute densité
		Polyesters coulés
121	(82-121)	Polyamides 6, 66, 6/10, 6/12, 11, 12
121	(50-121)	Polytéréphtalate d'éthylène
120	(100-120)	Mélamine-formol/cellulose
115	(93-115)	Acrylonitrile-styrène/20-33 % fibres de verre
115	(79-115)	Polyoxyde de phénylène
115	(71-115)	Ionomères
115	(68-115)	Propionate de cellulose
115	(60-115)	Acétate de cellulose
		Acétobutyrate de cellulose
107		Polybutyrène
104		Polyacétal/25 % fibres de verre
100	(80-100)	Polyéthylène basse densité
96	(60-95)	Acrylonitrile-styrène
93	(82-93)	Polystyrène/30 % fibres de verre
93	(71-93)	Chlorure de polyvinylidène
93	(60-93)	ABS
90		Polyacétal
88		Propionate de cellulose
		Polyurethane élastomère
		Polystyrène « chaleur »
85	(46-85)	Ethylcellulose
79	(65-79)	Chlorure de polyvinyle plastifié
79	(54-79)	Chlorure de polyvinyle rigide
79	(60-79)	Polystyrène « choc »
77		Urée-formol/cellulose
77	(65-77)	Polystyrène standard
75	(60-93)	Polyméthacrylate de méthyle
71		Phénol-formol coulé
60		Celluloid

ANNEXE N° 9
CHALEUR SPECIFIQUE
cal/g/°C

0,19		Résines époxydes/fibres de verre
0,19	(0,19-0,22)	Silicones/fibres de verre
0,22		Polychlorotrifluoroéthylène
0,23		Copolymère chlorure-acétate de vinyle (feuilles)
0,23	(0,23-0,27)	Polystyrène/ 20-30 % de fibres de verre
0,24	(0,24-0,27)	Phénol-formol/fibres de verre
0,25	(0,25-0,35)	Chlorure de polyvinyle rigide
0,25		Polytétrafluoroéthylène
		Polystyrène/fibres de verre
		Polyesters/fibres de verre
		Résines époxydes coulées
		Résines alkydes/fibres de verre
0,27		Mélamine-formol/fibres de verre
		Poly-imides
0,28		Ethylène-propylène fluoré
0,28	(0,28-0,30)	Polycarbonate
0,28	(0,28-0,55)	Polytéréphtalate d'éthylène
0,30		Polyamide 66/33 % fibres de verre
		Polyamide 11
		Polyamide 12
		Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
0,30	(0,30-0,50)	Chlorure de polyvinyle plastifié
0,31		Polysulfone
0,32		Poly-oxyde de phénylène
0,32		Polystyrène
		Chlorure de polyvinylidène
0,32	(0,32-0,40)	Phénol-formol/farine de bois
0,33		Fluorure de polyvinylidène
0,34		Polystyrène « choc »
		ABS
		Méthacrylate de méthyle-styrène
0,35		Polyacétal
		Acrylonitrile-styrène
		Polyméthacrylate de méthyle
		Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
0,35	(0,30-0,40)	Phénol-formol coulé
		Acétobutyrate de cellulose
		Propionate de cellulose
		Polyamide 6/12
0,36		Celluloïd
		Chlorure de polyvinyle plastifié
0,38	(0,30-0,50)	Acétate de cellulose
0,39	(0,30-0,75)	Ethylcellulose
0,40		Urée-formol/cellulose
		Mélamine-formol/cellulose
		Polyamide 6
		Polyamide 66
		Polyamide 6/10
0,40	(0,40-0,45)	Polyuréthane élastomère
0,45		Polybutyrène
		Polyamide 6/ 30-35 % fibres de verre
0,46		Polypropylène
0,52		Polyméthylpentène
0,55		Polyéthylène haute densité
		Copolymère éthylène-acétate de vinyle
0,56		Ionomères
		Polyéthylène basse densité
		Carbonate d'allyldiglycol
0,58		Polyamide 11

ANNEXE N° 10

CONDUCTIBILITE THERMIQUE

cal/cm/s/°C X 10^{-4} (ASTM-D 177)

1 (1 à 3)	Polystyrène « choc »
1,7 (1,7-7,4)	Polyuréthane élastomère
2,4 (2,4-3,3)	Polystyrène standard
2,8	Polypropylène
2,9	Acrylonitrile-styrène
3	Chlorure de polyvinylidène
	Fluorure de polyvinylidène
3 (3 à 4)	Chlorure de polyvinyle plastifié
3,5	Phénol-formol coulé, sans charge
3,5 (3,5-7,5)	Silicones coulées
3,5 (3,5-5)	Chlorure de polyvinyle rigide
3,8	Polyoxyde de phénylène/20-30 % fibres de verre
3,8 (3,8 à 7)	Ethylcellulose
3,9	Polyamide 12/ 30 % fibres de verre
4	Polyméthylpentène
	Polyesters coulés
4 (4 à 5)	Méthacrylate de méthyle-styrène
4 (4 à 6)	Polyméthacrylate de méthyle
4 (4 à 8)	Acétate de cellulose
	Propionate de cellulose
	Acétobutyrate de cellulose
4 (4 à 5)	Résines époxydes coulées
4 (4 à 10)	Résines époxydes/fibres de verre
4 (4 à 8,2)	Phénol-formol/farine de bois
4,2 (4,2-6,9)	Polytéréphtalate d'éthylène
4,5 (4,5 à 8)	ABS
4,6	Polycarbonate
4,7 (4,7-5,3)	Polychlorotrifluoroéthylène
4,9 (4,9-5,2)	Polycarbonate/10-40 % fibres de verre
5 (5 à 15)	Phtalate de diallyle/fibres de verre
5,1	Polyamide 66/33 % fibres de verre
	Polyamide 6/10/30-35 % fibres de verre
5,16	Polyoxyde de phénylène
5,2	Polyamide 6/10
	Polyamide 6/12
	Polyamide 11
	Polyamide 12
5,5	Polyacétal
	Celluloïd
5,8	Polyamide 6
	Polyamide 66
	Ionomère
6	Ethylène-propylène fluoré
	Polytétrafluoroéthylène
6,84	Polysulfures de phénylène, sans charge
7	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
7 (7-9)	Silicones/fibres de verre, moulées
7 (7-10)	Mélamine-formol/cellulose
	Urée-formol/cellulose
7 (7-25)	Phtalate de diallyle/charges minérales
8	Polyéthylène basse densité
8,2 (8,2-14,5)	Phénol-formol/Fibres de verre
10 (10 à 16)	Polyesters prémixes/fibres de verre
10 (10 à 20)	Résines époxydes coulées, charge de silice
10 (10 à 22)	Phénol-formol/amiante
11 (11-12,4)	Polyéthylène haute densité
12	Poly-imides/fibres de verre
15 (15-25)	Résines époxydes coulées, charge d'aluminium
	Résines alkydes/fibres de verre
18 (18 à 26)	Phénol-formol/charge métallique (fer, plomb)

ANNEXE N° 11

RIGIDITE DIELECTRIQUE

courte période kilovolts par mm d'épaisseur (ASTM-D 149)
(Chiffres moyens)

59000	Chlorure de polyvinyle rigide (maximum)
43000	Ionomères (maximum)
40000	Polyéthylène basse densité (maximum)
	Copolymère éthylène-propylène
35000	Polyuréthane rigide
32000	Chlorure de polyvinyle rigide (moyenne)
29000	Polyméthylpentène
	Polyamide 11
	Polytéréphtalate d'éthylène (film)
28000	Polystyrène normal
27000	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
26000	Polypropylène (maximum)
24000	Polystyrène « Choc »
23000	Polypropylène
	Polyamide 66
	Polychlorotrifluoroéthylène
	Ethylène-propylène fluoré
	Polyacétals/25 % fibres de verre
22000	Polyéthylène basse densité (minimum)
21000	Celluloid
20000	Chlorure de polyvinylidène (moyenne)
	Polyamide 6/fibres de verre
	Polyamide 66/fibres de verre
	Polytéréphtalate d'éthylène/30 % fibres de verre
19500	Polyamide 11/fibres de verre
19000	Polyéthylène haute densité
	Polycarbonate/fibres de verre
	Poly-imides
	Chlorure de polyvinyle plastifié (maximum)
	Polytétrafluoroéthylène
18000	Polystyrène « chaleur »
	Polyoxyde de phénylène
	Acrylonitrile-styrène
	Polyamide 12
17000	Polysulfone
	Polyméthacrylate de méthyle
	Polyamide 11
16500	Polytéréphtalate d'éthylène
	ABS
	Polyamide 6
	Polyamide 6/12
	Polyamide 6/10
16000	Ethylcellulose
	Polycarbonate
	Phénol-formol/farine de bois
	Polyesters/fibres de verre
15500	Polystyrène/30 % fibres de verre
15000	Polyacétal
14000	Chlorure de polyvinyle rigide (minimum)
	Chlorure de polyvinyle plastifié (minimum)
	Phtalate de diallyle/fibres de verre
	Phénol-formol coulé
	Urée-formol/cellulose
	Propionate de cellulose
13000	Mélamine-formol/cellulose
	Acétobutyrate de cellulose
12000	Acétate de cellulose
	Résines époxydes/fibres de verre (jusqu'à 15000)
	Silicones/fibres de verre
10000	Phénol-formol/fibres de verre
	Mélamine-formol/fibres de verre
	Fluorure de polyvinylidène

CONSTANTE DIELECTRIQUE

Elle varie de 2 à 9 pour la plupart des résines, la majorité ayant une constante comprise entre 2,2 et 5. L'incorporation de charges minérales peut porter la constante à 17 et même jusqu'à 30.

ANNEXE N° 12
INDICE DE REFRACTION

Ne concerne que les matières transparentes ou suffisamment claires

1,338	Ethylène-propylène fluoré
1,35	Polytétrafluoroéthylène
1,42	Fluorure de polyvinylidène
1,425	Polychlorotrifluoroéthylène
1,46-1,49	Propionate de cellulose
	Acétobutyrate de cellulose
1,46-1,50	Acétate de cellulose moulé
1,465	Polyméthylpentène
1,47	Ethylcellulose
1,48	Polyacétal
1,48-1,50	Polyméthacrylate de méthyle
1,49	Polypropylène
1,49-1,50	Acétate de cellulose (feuilles)
1,49-1,51	Celluloïd
1,50	Carbonate de diallyl-glycol
	Polybutylène
1,50-1,60	Polyuréthane élastomère
1,51	Ionomères
	Polyéthylène basse densité
1,52-1,55	Chlorure de polyvinyle rigide
1,523-1,570	Polyesters coulés
1,53	Polyamide 66
1,538	ABS clair
1,54	Polyéthylène haute densité
1,54-1,56	Urée-formol
1,55-1,61	Résines époxydes coulées
1,56-1,57	Acrylonitrile-styrène
1,567	Méthacrylate de méthyle-styrène
1,58-1,66	Phénol-formol, coulé, sans charge
1,586	Polycarbonate
1,59-1,60	Polystyrène
1,60-1,63	Chlorure de polyvinylidène
1,633	Polysulfone

ANNEXE N° 13
TRANSMISSION DE LA LUMIERE
%, épaisseur 0,5 mm (ASTM-D 1003-61)

92	Polyméthacrylate de méthyle
	Cellulose régénérée
90-92	Carbonate d'allyldiglycol
90	Méthacrylate de méthyle-styrène
	Polyméthylpentène
	Polytéréphtalate d'éthylène
	Chlorure de polyvinylidène
88	Acétate de cellulose (feuilles)
	Propionate de cellulose
	Acétobutyrate de cellulose
87-92	Polystyrène
86	Chlorure de polyvinyle à 16 % de DOP
85-91	Polycarbonate
85	ABS clair
	Chlorure de polyvinyle à 26 % de DOP
78-88	Acrylonitrile-styrène
76-82	Chlorure de polyvinyle rigide
75-85	Ionomères
74-90	Phénol-formol coulé
55-90	Polypropylène
39	Urée-formol/alpha-cellulose
35-57	Polystyrène « choc »
33.3 %	ABS « extrusion »
30 %	Mélamine-formol/alpha-cellulose
28 %	ABS « choc »
0,80	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
0,75	Polyéthylène basse densité
0,40	Polyéthylène haute densité

PS

AVANTAGES

- RIGIDITÉ
- STABILITÉ FORMES ET DIMENSIONS
- TRANSPARENCE CRISTAL POSSIBLE (TRANSMISSION 90%). BRILLANCE
- RÉSISTANCE AU CLIMAT TROPICAL
- EXCELLENTE ISOLATION ÉLECTRIQUE HF
- ALIMENTAIRE
- COÛT RÉDUIT
- FACILITÉ DE MOULAGE ET FORMAGE
- (LARGE INTERVALLE DE TEMPÉRATURE)
- FAIBLE RETRAIT (PRÉCISION 1/10 MM)
- COLLAGE, DÉCORATION ET IMPRESSION AISÉS
- SOUDURE PAR ULTRASONS

INCONVENIENTS

- FRAGILITÉ
- MAUVAISE TENUE THERMIQUE (60 A 70° C)
- COMBUSTIBLE
- ÉLECTROSTATIQUE
- SENSIBILITÉ AUX HUILES ET SOLVANTS
- SOUFFLAGE DIFFICILE

UTILISATIONS TYPES

PS ET PSC:

- EMBALLAGE THERMOFORMÉ (POTS DE YAOURT, DE CRÈME , GOBELETS...) OU INJECTÉ (BOITAGE, QUINCAILLERIE, PAPETERIE...), BOUCHAGE;

- AMEUBLEMENT, ARMOIRES DE TOILETTE, DIFFUSEURS D'ÉCLAIRAGE, ARTICLES MÉNAGERS, CABINES DE DOUCHES;

- APPAREILS DE RADIO, TÉLÉVISEURS, ÉLECTROPHONES (COFFRETS ET PIÈCES MOULÉS: BAS DE GAMME);

- ÉLECTROMÉNAGER, BACS, CUVES ET CONTRE-PORTES DE REFRIGÉRATEURS DOMESTIQUES;

- JOUETS, ARTICLES DE BUREAU ET DE DESSIN, STYLOS À BILLE, TALONS DE CHAUSSURES DE FEMME, BOBINES DE FILS À COUDRE.

AVANTAGES

ABS

- RIGIDITÉ (EN PARTICULIER OPPOSITION AVEC PEHD ET PP SEMI-RIGIDES)
- STABILITÉ DIMENSIONNELLE
- ASPECT AGRÉABLE (SURFACES DURES ET BRILLANTES)
- BONNE RÉSISTANCE AUX CHOCS ET AUX RAYURES
- ASSEZ BONNE TENUE À L'HUMITIDÉ ET À LA CHALEUR
- BON COMPORTEMENT EN PRÉSENCE DE CORPS GRAS
- ALIMENTAIRE
- MOULAGE ET FORMAGE AISÉS
- FACILITÉ D'IMPRESSION ET DE DÉCORATION PAR MÉTALLISATION SOUS VIDE OU ÉLECTROPLACAGE

INCONVENIENTS

- OPACITÉ
- TRÈS ÉLECTROSTATIQUE
- TENUE CHIMIQUE ASSEZ FAIBLE
- MAUVAISE TENUE AU VIEILLISSEMENT À L'EXTÉRIEUR

UTILISATIONS TYPES

ABS:

- AUTOMOBILE (ÉLEMENTS DE GARNISSAGE INTERNE, CALANDRES);
- ÉLECTROMÉNAGER (CAPOTAGES, CARTERS, CUVES DE RÉFRIGÉRATEURS ISOLÉS AU PU...);
- APPAREILS DE RADIO, TÉLÉVISEURS, APPAREILS PHOTO (BOÎTIERS HAUT DE GAMME);
- APPAREILS TÉLÉPHONIQUES;
- AMEUBLEMENT, ÉLEMENTS DE CARAVANE;
- BAGAGERIE;
- DESSUS DE SKI (FEUILLE COLORÉE DU DÉCOR);
- PETITES PIÈCES CHROMÉES (BOUCHONS, BOUTONS, BOUCLES, POIGNÉES...).

AVANTAGES

PVC RIGIDE

- RIGIDITÉ, STABILITÉ DIMENSIONNELLE
- RÉSISTANCE À L'ABRASION
- AUTO-EXTINGUIBILITÉ
- TRANSPARENCE POSSIBLE (POUR QUALITÉ-SUSPENSION OU MASSE)
- ABSORPTION D'EAU PRATIQUEMENT NULLE
- IMPERMEABILITÉ AUX GAZ ET PERMÉABILITÉ RELATIVE À LA VAPEUR D'EAU (CONTRAIRE DU PE)
- ALIMENTAIRE
- BON COMPORTEMENT AUX AGENTS CHIMIQUES (HUILE, GRAISSE, OZONE)
- EXTRUSION, FORMAGE, USINAGE, SOUDAGE HE AISÉS

INCONVENIENTS

- DENSITE RELATIVEMENT ÉLEVÉE (1,4)
- FRAGILE À BASSE TEMPÉRATURE
- BRUNISSEMENT AUX UV
- PRÉCAUTIONS À PRENDRE A L'INJECTION (FAIBLE INTERVALLE DE TEMPÉRATURE)
- DÉGAGEMENT DE VAPEURS CHLOREUSES EN CAS DE DÉCOMPOSITION
- MAUVAISE TENUE EN PRÉSENCE DE CARBURANTS

UTILISATIONS TYPES DES PVC

PVC RIGIDE:

- TUBES ET TUYAUX (ADDUCTION D'EAU, BÂTIMENT, ASSAINISSEMENT, IRRIGATION, DRAINAGE, GAME POUR CÂBLE), RACCORDS;
- CORPS CREUX: BOUTEILLES ALIMENTAIRES (EAU, HUILE, VIN, VINAIGRE), FLACONS DE PARFUMERIE;
- EMBALLAGES THERMOFORMÉS (BEURRE, BISCUIT, CONFISERIE, FRUIT, CACHET PHARMACEUTIQUE...), BLISTERS (CONDITIONNEMENT SUR CARTE, COUVERCLES;
- PROFILÉS (VOLETS ROULANTS SURTOUT); (EUROPE)
- CHAUDRONNERIE (PLAQUES);
- DISQUES MICROSILLON (SEMI RIGIDE)
- CARTES DE CRÉDIT.
- PROFILÉS- FÉNESTRATION, BARDAGES

AVANTAGES

PVC SOUPLE

- SOUPLESSE COMPARABLE AU CAOUTCHOUC
- SOUDAGE HF AISÉ

INCONVENIENTS

- TENUE CHIMIQUE RÉDUITE PAR L'ADJONCTION DE PLASTIFIANTS
- NÉCESSITÉ D'ANTI-OXYDANTS (POUR ÉVITER L'OXYDATION DES PLASTIFIANTS) ET D'AGENTS DE BLOCAGE
  (POUR ÉVITER LA MIGRATION DES PLASTIFIANTS)
- NON ALIMENTAIRE
- COLLAGE DIFFICILE

UTILISATIONS TYPES DES PVC

PVC SOUPLE:

- REVÊTEMENTS DE SOL (SUR FEUTRE, AMIANTE OU VINYLIQUE EN FEUILLE ET DALLE); CES PRODUITS COMPORTENT ENVIRON 15% DE PVC ENDUIT;
- TISSUS ENDUITS (SIÈGES D'AUTOMOBILE ET MOBILIER, MAROQUINERIE, BAGAGERIE, VÊTEMENTS, CHAUSSURES);
- ISOLATION DE CÂBLES ET FILS ÉLECTRIQUES;
- PROFILS SOUPLES ET JOINTS;
- CHAUSSURES ET SEMELLES;
- COUVERTURES DE CLASSEURS ET CAHIERS, TROUSSES, HOUSSES;
- BAGAGERIE SOUPLE;
- NAPPES, RIDEAUX;
- OBJETS GONFLABLES PUBLICITAIRES.

AVANTAGES

PE BD

- SOUPLESSE (SANS PLASTIFIANT)
- TENUE AUX CHOCS (PRATIQUEMENT INCASSABLE)
- INERTIE CHIMIQUE (EN PARTICULIER RÉSISTANCE A L'ACIDE FLUORHYDRIQUE QUI ATTAQUE VERRES ET MÉTAUX)
- IMPERMÉALIBITÉ À L'EAU
- ALIMENTAIRE
- COÛT RÉDUIT
- MOULAGE ET EXTRUSION FACIALES (LARGE INTERVALLE DE TEMPÉRATURE)
- ISOLATION ÉLECTRIQUE

INCONVÉNIENTS

- FAIBLE TENUE THERMIQUE, INFLAMMABLE
- OXYDATION AUX UV (SAUF COLORATION NOIRE "CARBON BLACK")
- PERMÉABILITÉ AUX GAZ (O_2, CO_2)
- DESTRUCTION PAR LES RONGEURS (SAUF QUALITÉ SPÉCIALE)
- RETRAIT DIFFÉRENTIEL AU MOULAGE
- NÉCESSITÉ DE TRAITEMENT PRÉALABLE AVANT IMPRESSION
- COLLAGE DIFFICILE, SOUDURE HF IMPOSSIBLE

UTILISATIONS TYPES

PEBD:

- EMBALLAGE SOUS FORME DE GAINE OU FILM: SACHETS ET SACS POUR PRODUITS ALIMENTAIRES OU INDUSTRIELS, SACS CABAS, SACS POUBELLES, SACS GC (CONTENANCE 50 KG: ENGRAIS, FARINE, SUCRE, SEL...), COMPLEXES ALIMENTAIRES AVEC PAPIER OU ALUMINIUM, FILMS RÉTRACTABLES ET ÉTIRABLES POUR FARDELAGE OU PALETTISATION, CAPSULES DE BOUCHAGE, TUBES DE CRÈME SOUPLE;

- FILMS POUR BÂTIMENT OU TP ET AGRICULTURE (ENSILAGE, PAILLAGE, SERRES-TUNNELS);

- PRODUITS MÉNAGERS (SEAUX, POUBELLES), FLEURS ARTIFICIELLES;

- JOUETS SOUPLES;

- TUYAUX, REVÊTEMENTS DE CÂBLES TÉLÉPHONIQUES.

AVANTAGES

PEhD

- CARACTÉRISTIQUES AMÉLIORÉES DU PEHD
- RIGIDITÉ (OU SEMI-RIGIDITÉ)
- TENUE EN TEMPÉRATURE (STÉRILISABLE) ET AU FROID
- ANTI-ADHÉRENCE
- STABILITÉ CHIMIQUE ET TENUE AUX RADIATIONS
- MOINDRE SENSIBILITÉ À LA FISSURATION SOUS TENSION
- ALIMENTAIRE

INCONVENIENTS

- COMBUSTIBLE
- OXYDATION AUX UV
- RETRAIT NON HOMOGÈNE

UTILISATIONS TYPES DES PEHD

PEhD:

- CAISIERS À BOUTEILLES, CAISSES DE MANUTENSION;
- FLACONS DE DÉTERGENT ET PRODUIT D'ENTRETIEN, BOUTEILLES DE LAIT STÉRILISÉE;
- BIDONS D'HUILE À MOTEUR, "JERRYCANS", FOSSE SEPTIQUES;
- FILMS MINCES (SACS "SORTIE DE CAISSE", EMBALLAGE DE VIANDE, DE POISSON, POCHETTES INTERNES DE DISQUE);
- COQUES DE CANOT, SEMELLES DE SKI, CARTOUCHES DE CHASSE.

AVANTAGES

PP

- BONNE TENUE MÉCANIQUE, RIGIDITÉ, RÉSISTANCE À L'ABRASION
- EXCELLENTE RÉSISTANCE À LA FLEXION (RÉALISATION DE CHARNIÈRES MINCES SUPPORTANT DES MILLIONS DE MANOEUVRES)
- TENUE EN TEMPÉRATURE ÉLEVÉE (ENVIRON 110° C) ET CONSERVATION DE SES PROPRIÉTÉS JUSQU'À LA TEMPÉRATURE DE RAMOLLISSEMENT
- PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES
- BONNE RÉSISTANCE CHIMIQUE ET ABSENCE DE FISSURATION SOUS CONTRAINTE
- BEL ASPECT, BRILLANCE, RAYURE DIFFICILE
- ALIMENTAIRE
- FAIBLE DENSITÉ (0.90)

INCONVENIENTS

- LES MÊMES QUE PEHD AVEC EN PLUS:
- FRAGILITÉ À LA BASSE TEMPÉRATURE, ON PALLIE CECI PAR UTILISATION DU COPOLYMÈRE PPE
- FORMAGE PLUS DIFFICILE
- NÉCESSITÉ DE CONFORMATEUR POUR GROSSE PIÈCE.

UTILISATIONS TYPES

PP:

- FICELLES ET CORDAGES;
- BANDELLETTES TISSÉES POUR SACS TGC (CONTENANCE 100 KG: POMMES DE DE TERRE, CHARBON, SABLE, ...) ET POUR SUPPORT DE TAPIS MOQUETTE ("BACKING");
- FEUILLARDS DE CERCLAGE;
- COMPLEXES D'EMBALLAGE;
- FILMS D'ASPECT (BISCOTTES, CHIPS, CONFISERIE... BONNETTERIE) ET PELLICULAGE (COUVERTURES DE LIVRES ET DE POCHETTES DE DISQUE);
- COQUES DE SIÈGE DE PLEIN AIR OU TERRASSE;
- PIÈCES TECHNIQUES POUR L'ÉLECTROMÉNAGER (MACHINES A LAVER, SÈCHE-CHEVEUX, ASPIRATEURS) ET POUR L'AUTOMOBILE (DISPOSITIFS DE CHAUFFAGE, FILTRES A AIR, BACS D'ACCUMULATEUR, BUSES D'AÉRATION...);
- BOÎTAGE A CHARNIÈRE INTÉGREE (ÉTUIS A LUNETTES, STYLOS... POUDRE, FARD..., BOÎTIERS DE PILE, MALETTES ...);
- ACCESSOIRES DE SALLE DE BAINS;
- CRAYONS FEUTRE, CARTOUCHES D'ENCRE;
- SERINGUES À JETER;
- CHAUDRONNERIE (PLAQUES).

COMPOSITES (Principes généraux)

Tran VU-KHANH

I.1.- INTRODUCTION

Depuis quelques années on constate un développement extrêmement important des matières plastiques à hautes performances dans des usages autrefois réservés aux métaux. En effet en associant des résines à des matériaux de renfort comme les fibres de verre, de carbone, de bore, d'aramide, etc., on a créé des "composites" dont les performances mécaniques égalent et très souvent dépassent largement celles des meilleurs alliages métalliques, tout en ayant une masse spécifique plus basse. Le tableau I.1 donne quelques exemples.

Tableau I.1

Matériaux	Densité kg/m³	Module MPA** traction	Résistance MPA*** traction
Kevlar 49*	1 380	75 840	1 380
Verre E*	2 000	45 000	1 100
Verre R*	2 000	53 700	1 600
Carbone HR*	1 500	120 000	1 600
Acier	7 800	210 000	500
AG4MC	2 700	70 000	270

* *Composites unidirectionnels contenant 60 % en volume de fibres liées par une résine époxyde.*

** *1 MPA = 0,1 KGf/mm².*

*** *Pour les métaux, il faut diviser les résistances par deux pour tenir compte des soudures.*

I.2.- HISTORIQUE ET DÉFINITION D'UN MATÉRIAU COMPOSITE

En associant des fibres de renfort à caractéristiques mécaniques très élevées avec une matrice ductile, facile à mettre en oeuvre, de densité faible, mais de performances modestes, on utilise un principe naturel que l'on trouve dans le bois, le cuir, etc.

C'est ce principe que nos ancêtres ont également utilisé en construisant des murs en pisé (argile + paille), puis plus tard en staff (plâtre renforcé par de la filasse), en béton armé, etc. C'est également en partant de la même idée que les mésopotamiens fabriquaient, il y a 4000 ans, des koufas en toile enduite de bitume pour naviguer sur le Tigre. Ces embarcations sont d'ailleurs toujours en usage. C'est aussi la méthode que l'on a retrouvée ensuite dans la fabrication des premiers avions en toile enduite ...
Le développement industriel de ces matériaux a réellement commencé lorsque l'industrie chimique a mis à notre disposition en quantités importantes :

- Des renforts constitués de fibres de tissus, de bandes, etc. assurant la résistance aux contraintes de traction, de flexion, de compression, de torsion, la résistance aux chocs, l'amélioration des propriétés électriques ou thermiques, etc. Ces matériaux sont d'origine minérale (verre, carbone, bore ...), organique (aramide, nylon, polyester ...), métallique (acier, tungstène).

- Des matrices : résines synthétiques qui assurent la liaison des renforts, la résistance en compression, la résistance aux produits chimiques ... Pour des raisons de prix ou pour améliorer certaines propriétés mécaniques, ces résines sont parfois chargées.

I.3.2.- Exemple de flexion d'une poutre

Soit le cas d'une poutre cylindrique pleine, posée sur deux appuis. On fait fléchir cette poutre sous l'effet d'une force appliquée en son milieu (figure I.2).

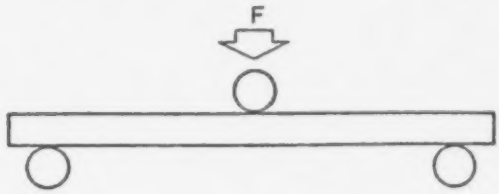


Figure I.2

Nous allons calculer la déformation f avec les hypothèses suivantes :

- La masse de la poutre est la même pour les différents matériaux essayés.
- La distance L entre appuis est constante.
- La charge est la même dans chaque cas.

Nous avons la déformation :

$$f = \frac{FL^3}{48EI}$$

avec :

E : module élastique du matériau

$I = \frac{\pi}{4} R^4$: inértie de la poutre

et la masse :

$$M = \rho \pi R^2 L = C^{te}$$

Ce qui entraîne :

$$f = K \frac{\rho^2}{E}$$

K étant une constante.

Dans cet exemple, les déformations obtenues sur les différents matériaux déjà cités seront dans les rapports suivants :

Tableau I.3

Composite carbone HM + époxyde	1,0
Composite carbone HR + époxyde	1,5
Composite verre E + époxyde	7,1
Dural	8,5
Acier	22,6

Cet exemple pourrait être repris pour diverses formes : plaques, barres rectangulaires, coques de navire, structures automobiles, etc. ; la conclusion serait toujours identique : à masse égale, les constructions en composites sont plus rigides que les constructions métalliques.

Si au lieu de comparer les rigidités nous avions comparé les résistances à la rupture, nous aurions trouvé un résultat semblable.

I.3.3.- Autres propriétés générales

Résistance aux produits chimiques excellente. Forte résistance à la corrosion marine.

Possibilité de fabriquer des matériaux isolants (électriques et thermiques) ou conducteurs.

Résistance à la fatigue supérieure à celle de métaux.

Insensibilité aux rayures, non propagation des "criques", etc.

Mise en oeuvre moins onéreuse que celle des métaux. Moulage aux formes définitives, sans usinage et sans perte de matière, etc.

I.3.4.- Limitations

Les limitations sont essentiellement :

- la tenue thermique inférieure à 250°C (dépendant de la résine) (figure I.1) ;
- la tenue au feu qui peut être insuffisante pour certains d'entre eux.

Toutefois, les constructions métalliques ont souvent un comportement plus médiocre. Ainsi, une société finlandaise a pu réaliser un bateau de sauvetage en verre et polyester capable de traverser une nappe de pétrole enflammée de 1 mille marin, ce qu'aucun bateau métallique ne ferait.

I.3.5.- Contenu énergétique des fibres

Lorsqu'on se pose le problème du choix d'un matériau à utiliser pour la fabrication d'une pièce, on utilise un certain nombre de critères qui sont :

- caractéristiques mécaniques ;
- dimensions, formes ;
- série à réaliser ;
- prix de revient usine.

Il est devenu indispensable de tenir compte d'un nouveau critère qui est le contenu énergétique du matériau, c'est-à-dire de la quantité d'énergie consommée pour l'élaboration et la transformation du matériau.

Dans les transports, on commence également à tenir compte de l'énergie économisée sur le fonctionnement.

Le tableau I.4 donne le contenu énergétique comparé de composites et de quelques autres matériaux.

Les valeurs citées peuvent différer selon les auteurs en raison de :

- différence de procédés de fabrication, en particulier pour les résines ;
- la prise en compte du transport des matières et de dépenses d'énergie annexes ;
- la comparaison effectuée parfois à des niveaux d'élaboration différents ;
- les sources d'énergie utilisées entraînant parfois des rendements différents.

Tableau I.4

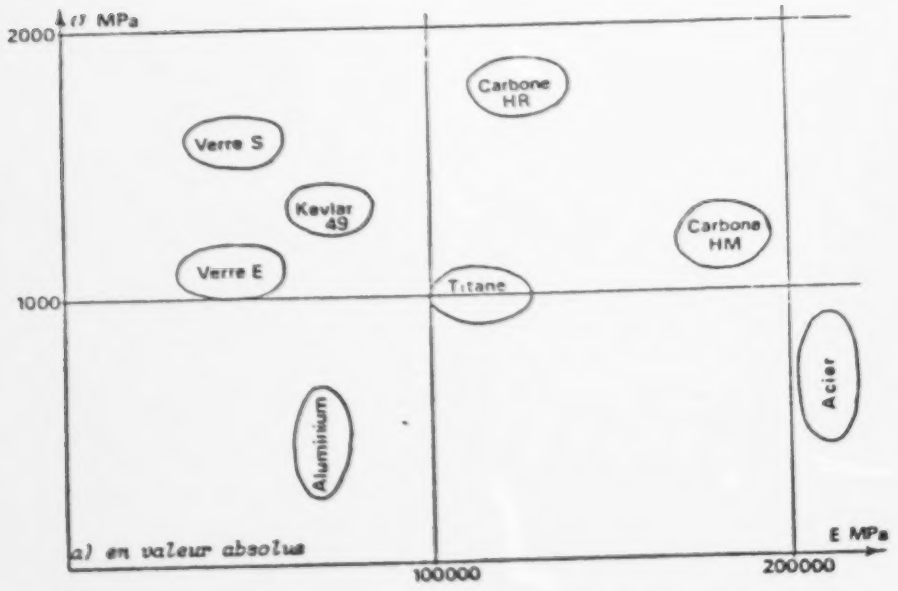
Unités	MJ*/kg	MJ/dm³
Aluminium première fusion ..... (pièce moulée)	187	514
Aluminium deuxième fusion ..... (pièce moulée)	37	102
Aluminium pièce moulée automobile ..... 35 % première fusion 65 % deuxième fusion	90	247
Tôle d'aluminium	157	481
Tôle d'acier	29,3	228
PA 6,6 + 30 % fibres de verre	168	227
Résine thermodurcissable (polyester) ...	92	110
Fibres de verre selon type	44 à 124	112 à 193
Fibres de carbone	100	180
Fibres de graphite	130	240

* *MJ : Méga Joule. 1 KWh = 3,6 MJ.*

Aux valeurs de ce tableau, il faut ajouter l'énergie utilisée pour la transformation. Elle est en général faible pour les matieres plastiques renforcées.

Ce tableau montre que ces matériaux sont en général mieux placés que les métaux.

On peut aussi en tirer une conclusion supplémentaire : l'asymptote du prix de revient d'un matériau est le prix de l'énergie nécessaire à son élaboration. En quantités comparables, avec des procédés de fabrication automatisés les fibres de carbone devraient avoir un prix voisin de celui de l'aluminium.



a) en valeur absolue

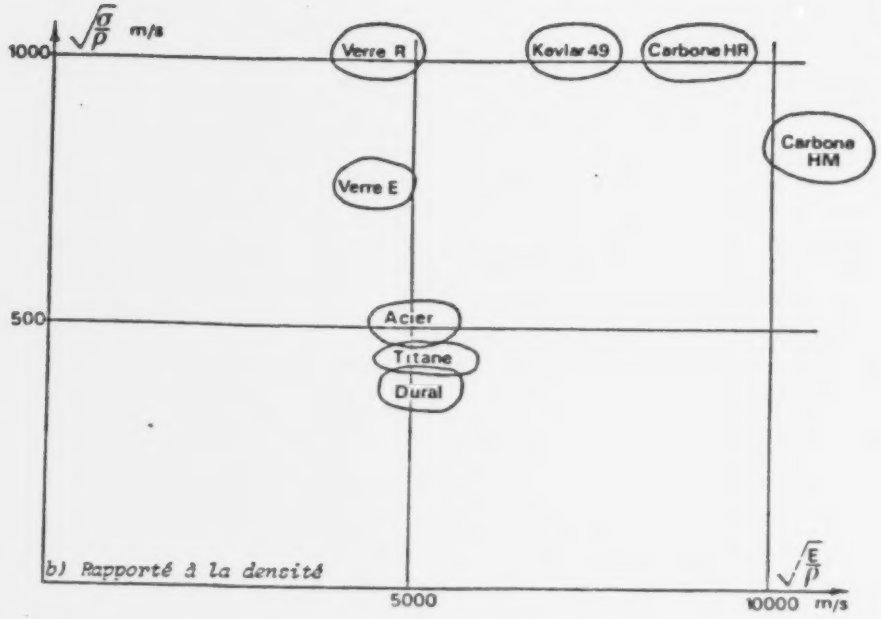


Figure I.1
Comparaison Composites-Métaux*

* *Unidirectionnels 60 % Fibres + Epoxyde*

Tableau II.5

	MOULAGE				CARACTERISTIQUES MECANIQUES			TENUES A CHAUD		
Résines	à chaud + pression	à chaud	à froid	à froid + pression	traction σ_t MPa	flexion σ_f MPa	module E MPa	en continu	en pointe	Etat de livraison
Phénoliques	X				50		5 000	120° 250°	200° 350°°	sirop solution pastilles
Aminoplastes	X				60	7-90	5 000	150°	200°	sirop solution
Furaniques	X	X	X							sirop solution
Silicones	X	X	X		140	150		300°	400°	pâtes résines solides liquides
Polyesters	X	X	X	X	60-100	80	2 500	120°	250°	sirop
Epoxydes	X	X	X	X	30-90	100-150	3 500	180°	300°	sirop
Polyimides	X	X	X		70-90	100	4 000	300°	480°	
Polybenzimidazole	X	X	X					250°°	430°	

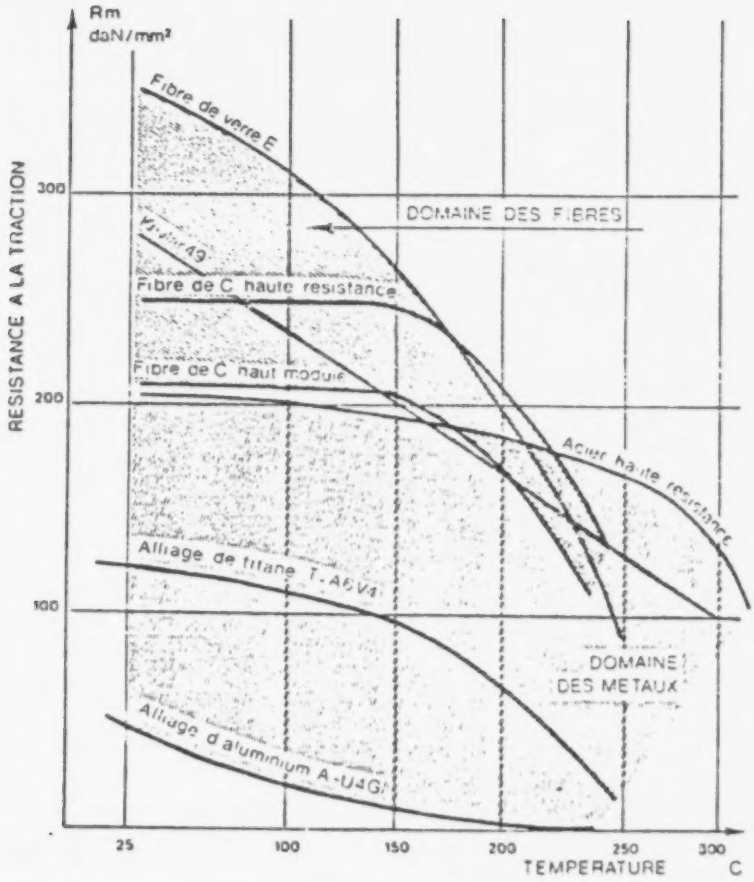


Figure II.2
Comparaison fibres-métaux

Tableau III.1

Fibres	Masse spécifique kg/m³	Module élastique traction MPA	Rupture traction MPA
Polyamide	1 170	6 300	1 300
Polyester	1 400	8 000	550
Nomex	1 200	18 000	
Sisal	1 450	45 000	850
Aramide (K29)	1 450	60 000	2 000
Verre E	2 560	75 000	2 000
Verre R	2 500	85 000	3 000
Carbone BM	1 700	180 000	1 800
Aramide (K49)	1 450	140 000	3 000
Amiante	2 200	180 000	2 000
Carbone HR	1 850	220 000	3 000
Acier	7 800	210 000	500 à 2 000
Tungstène	19 200	350 000	2 500
Carbone HM	1 900	400 000	2 200
Bore	2 500	450 000	3 500
SiC	3 200	450 000	2 000
Carbone THM	1 950	650 000	2 000

On utilise également des renforts constitués par des billes de verre creuses, des charges filamentaires courtes, etc.

1.1 - DEFINITIONS PLI, COUCHE, STRATIFIE

Les définitions ci-dessous ne reprennent que les termes principaux utilisés dans ce chapitre :

- Renfort unidirectionnel : fibres de renforcement disposées dans une seule direction (sauf indication contraire, le renfort est supposé continu).
- Tissus : assemblage de mèches entrelacées.
- Renfort dispersé : fibres disposées sans direction préférentielle, ou réparties aléatoirement sur une surface (sauf indication contraire, les fibres sont supposées coupées et de quelques centimètres de longueur) - autre dénomination mat.
- Pli : nappe élémentaire dans la constitution d'un stratifié.
- Couche : ensemble de plis identiques empilés avec la même direction.
- Stratifié : ensemble de couches empilées et orientées de façon quelconque les unes par rapport aux autres.
- Stratifié hybride : stratifié comportant au moins deux renforts de nature différente (par exemple verre et carbone ou tissus mixtes à tissage de fils de natures différentes : verre et aramide...
- "Sandwich" : ensemble composé d'une âme très légère (mousse, nid d'abeille, ...), et de parements ou peaux ayant le principal rôle mécanique.

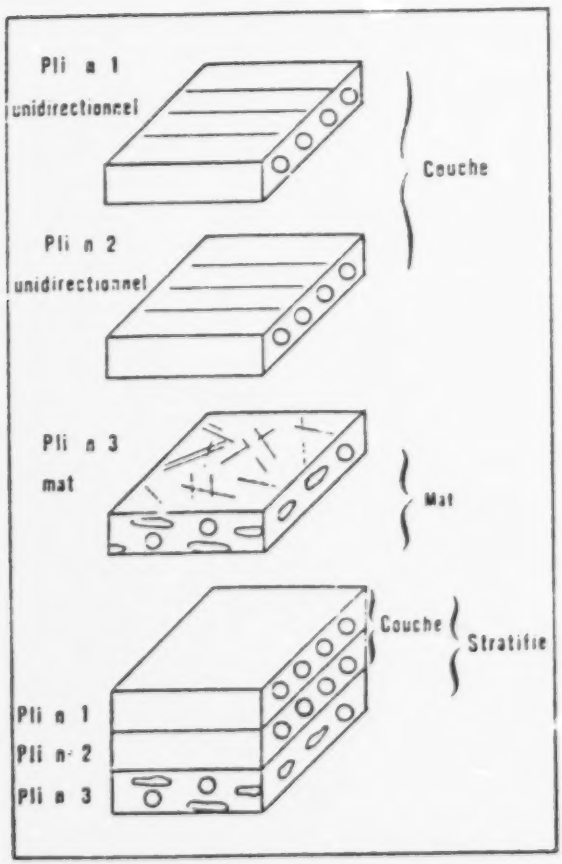
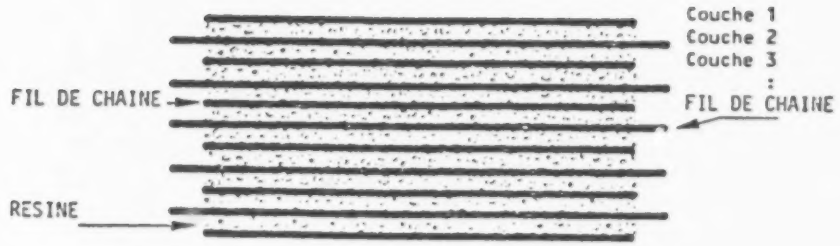
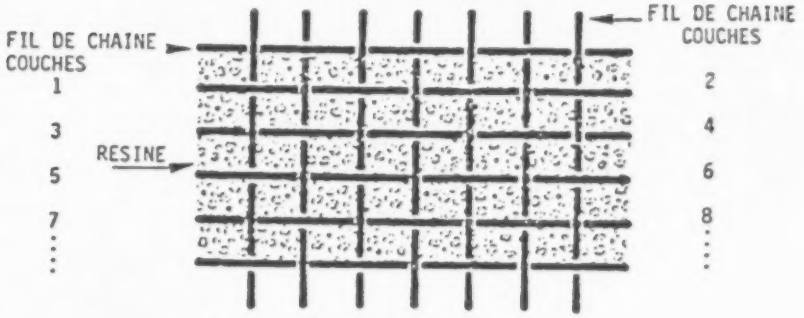


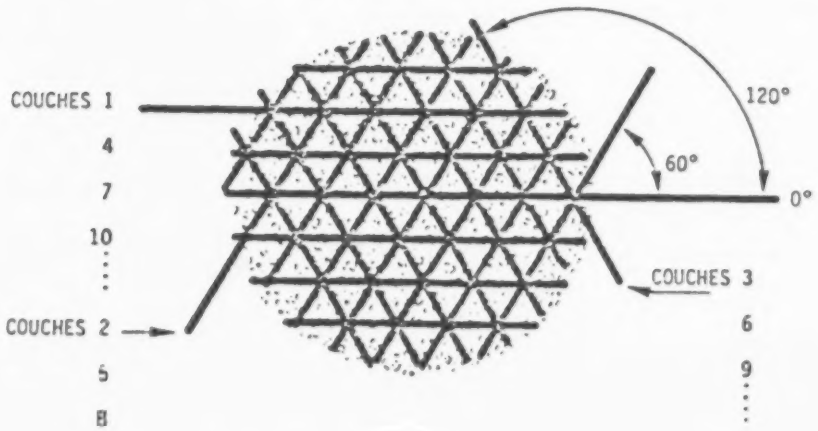
FIGURE N° 1. - DEFINITION DES TERMES PLI-COUCHE-STRATIFIE.



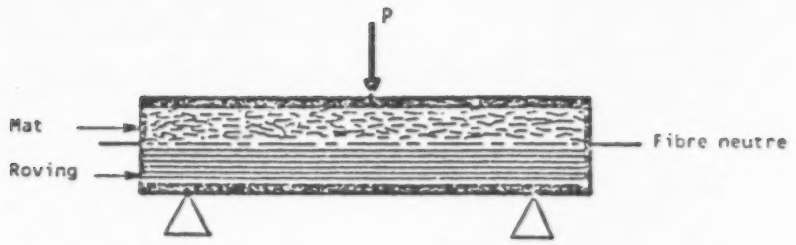
STRATIFICATION PARALLELE



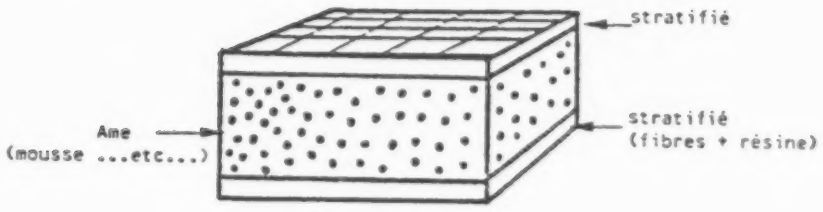
STRATIFICATION CROISEE



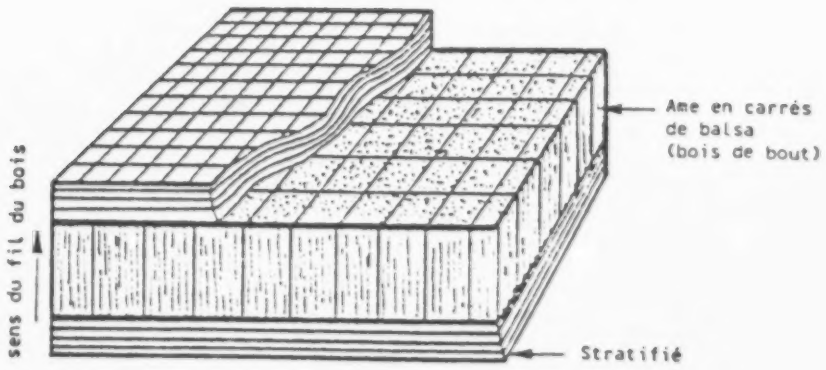
STRATIFICATION A 3 DIRECTIONS

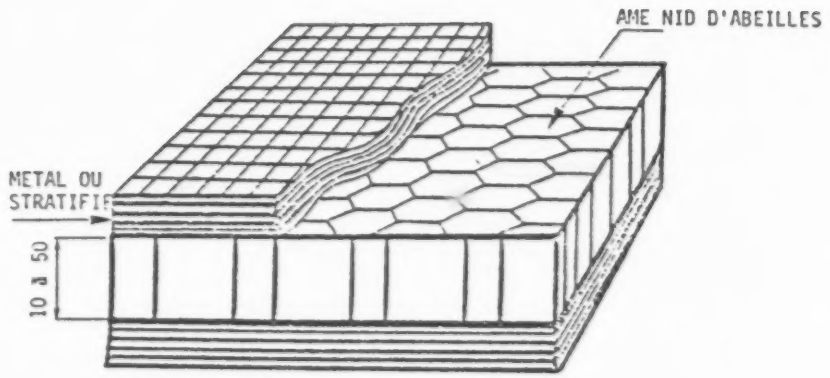


LE MAT RESISTE A LA COMPRESSION
LES ROVINGS SUPPORTENT LA TENSION

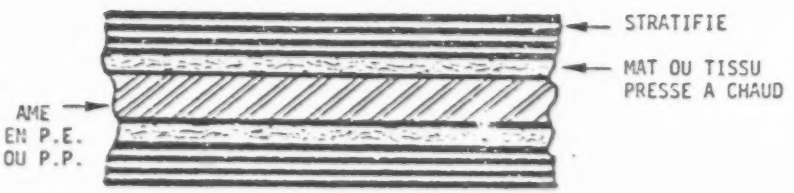


SANDWICH

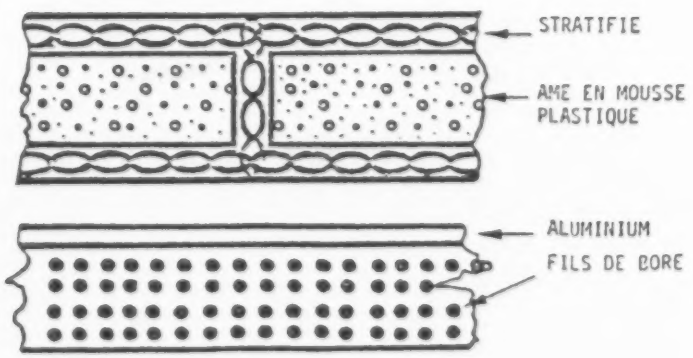


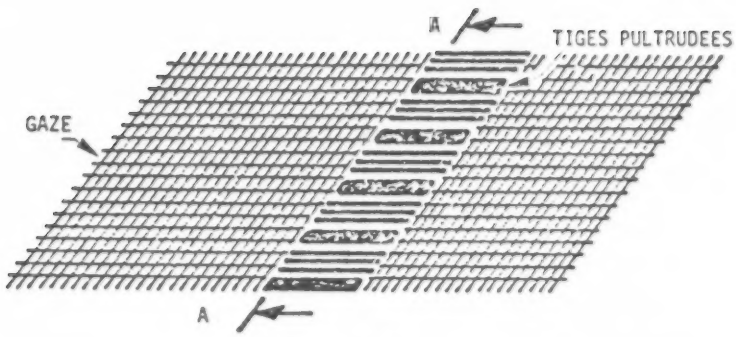


SANDWICH HONEY COMB

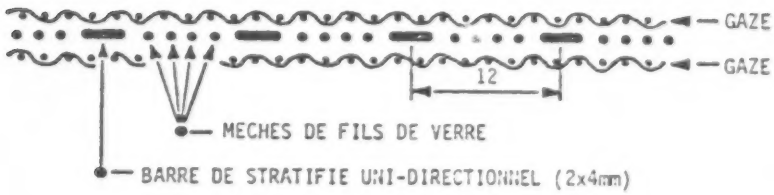


SANDWICH SUR AME EN THERMOPLASTIQUE

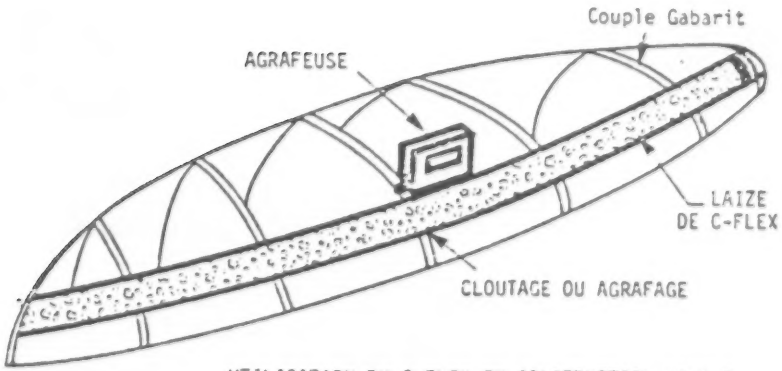




TISSU C-FLEX

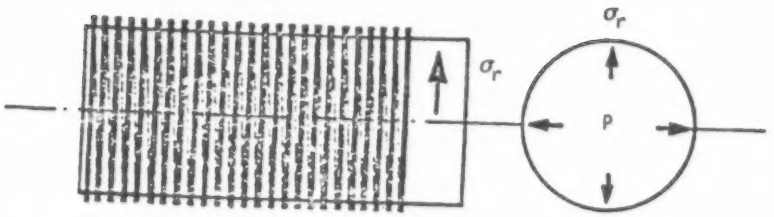


COUPE AA DU TISSU C-FLEX



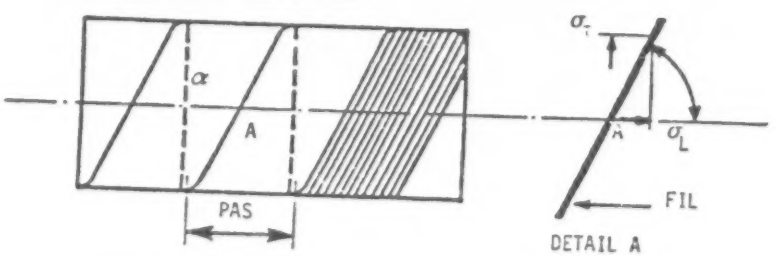
UTILISATION DU C-FLEX EN CONSTRUCTION NAVALE

1- ENROULEMENT CIRCONFERENTIEL



SPIRES JOINTIVES

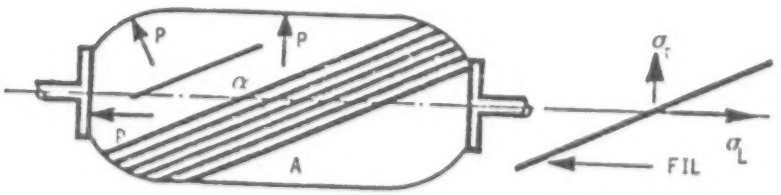
2- ENROULEMENT HELICOIDAL



SPIRES JOINTIVES

DETAIL A

3- ENROULEMENT POLAIRE



SPIRES JOINTIVES

DETAIL A
ZONE CENTRALE

Figure V.6
Types d'enroulements

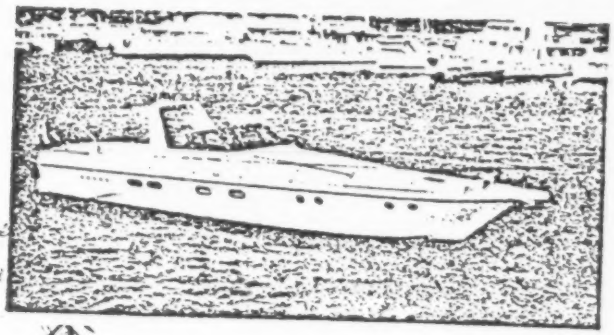


Photo 13
Vedette en stratifié Kevlar-polyester
Fabrication COUACH

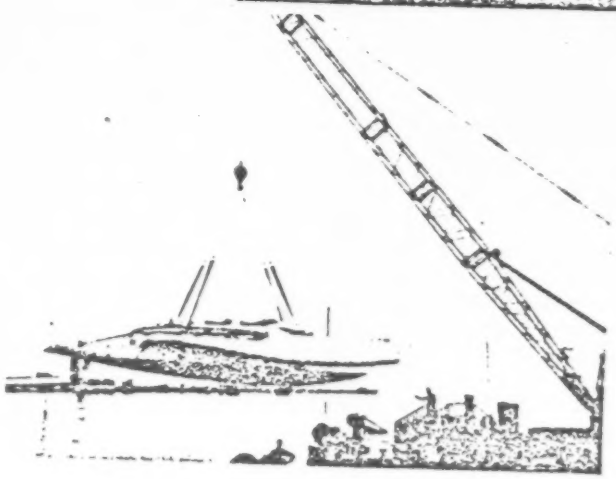


Photo 14
Voilier verre-polyester
Architecte Xavier Joubert

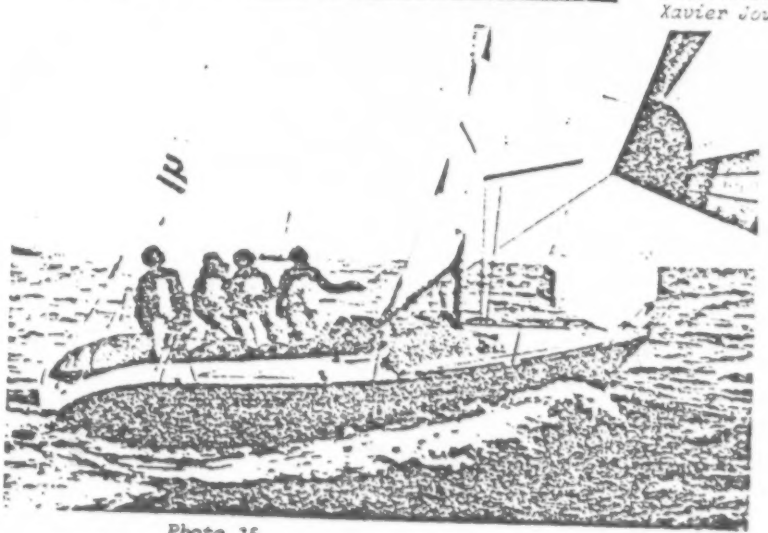


Photo 15
Voilier Construction JEANNEAU - Photo HIPPOPHOT G. BEAUVAIS

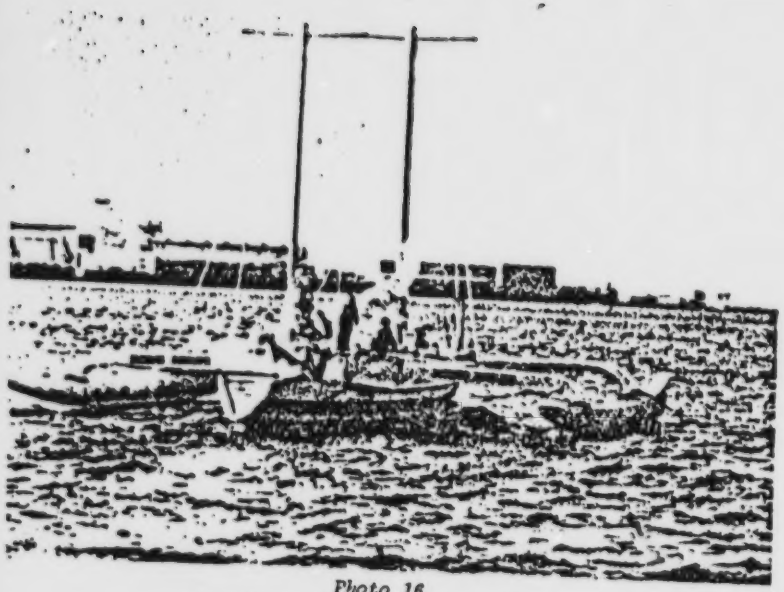


Photo 16
Trimaran "Jacques Ribourel"

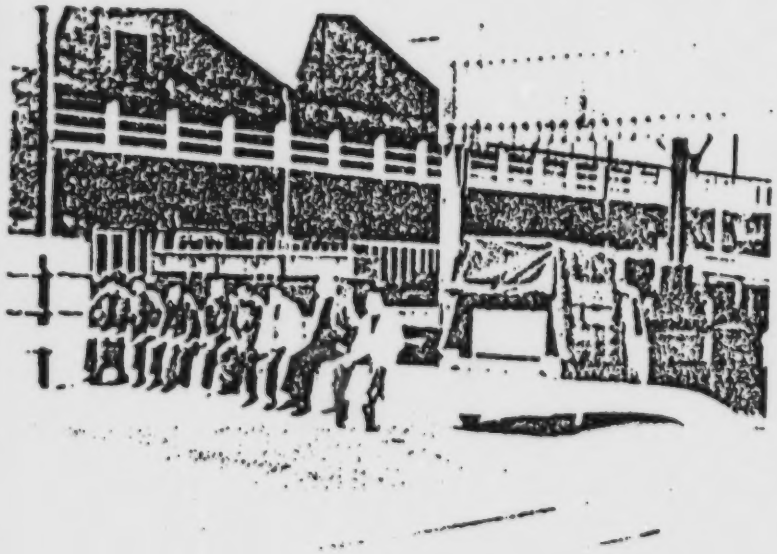


Photo 17
Bras de liaison du trimaran "Jacques Ribourel"

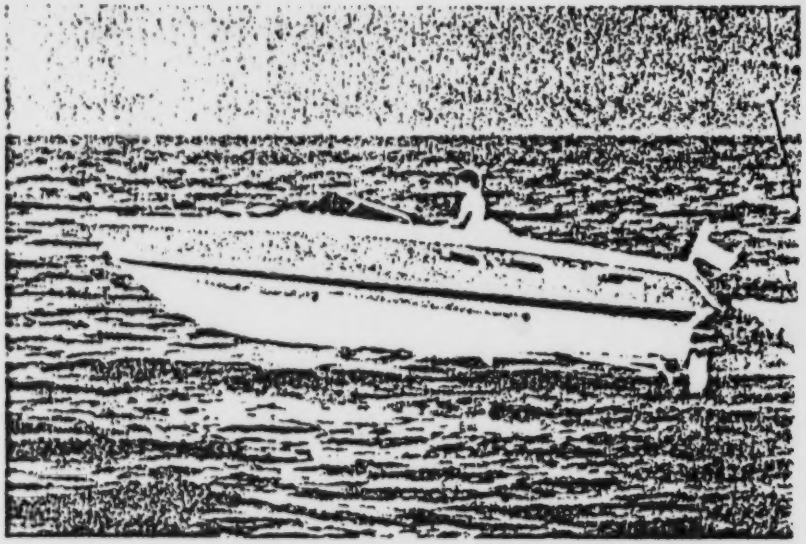


Photo 18
Bateau Offshore, fibres de carbone, de verre et résine polyester
Construction RIVA

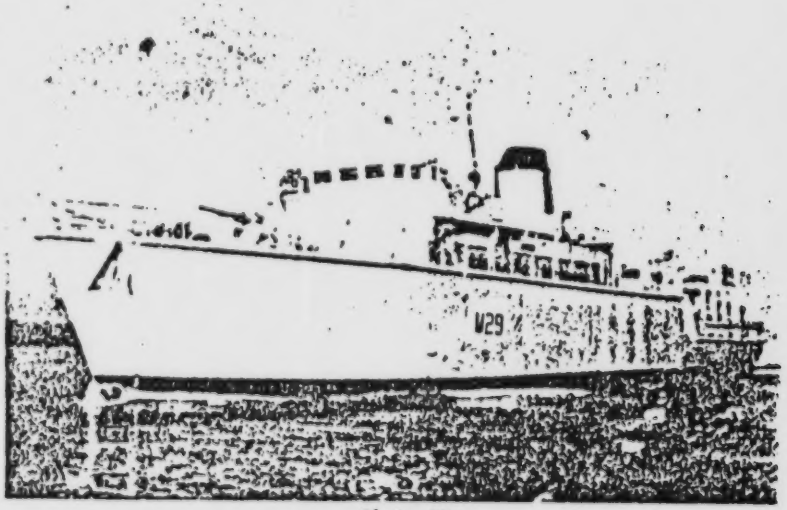
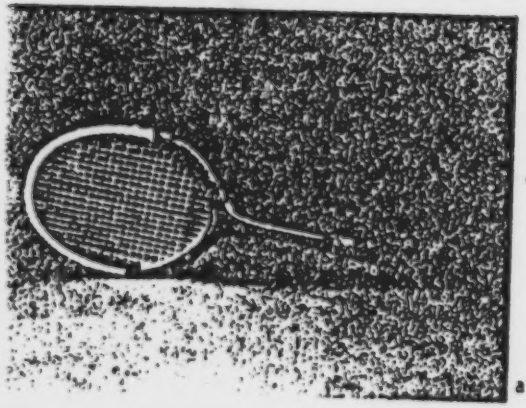
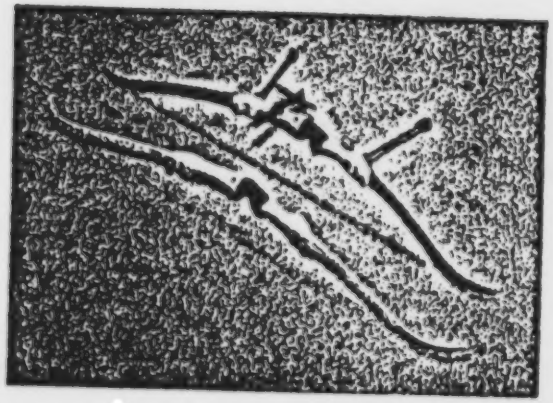


Photo 19
Chasseur de mines
Cliché DCAN

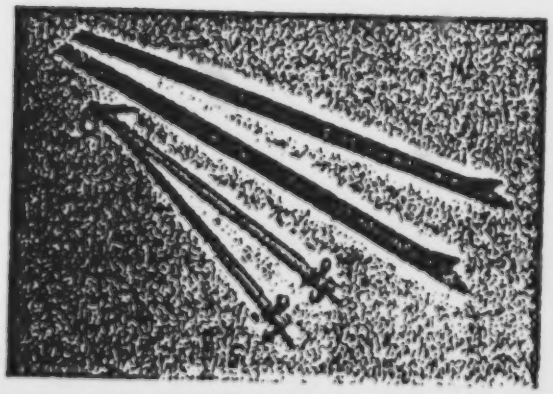


a)

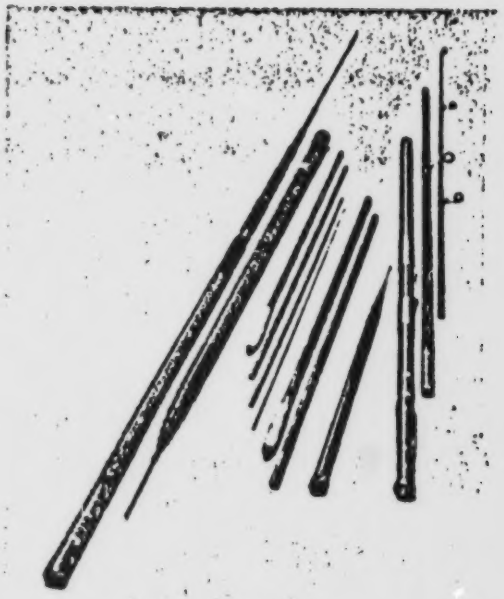
Photos 20
Articles de sport
en
fibre de verre-époxyde



b)



c)



d)

e)

LE PLASTIQUE ARMÉ

Germain Bélanger, ing.*

Résumé

Les plastiques renforcés par des fibres de verre ont occupé une place importante, au cours des dernières années, en tant que matériaux légers, de haute solidité et possédant des propriétés particulières qui les différencient, par beaucoup de points, des plastiques les plus connus.

On peut se demander pourquoi la fabrication des plastiques renforcés exige des connaissances spécialisées et de quelle façon elle se différencie des méthodes d'emploi des plastiques plus courants. Ces différences sont considérables et cela résulte de ce que les plastiques renforcés sont généralement appelés, dans le domaine structural, à remplir un rôle beaucoup plus important et qu'il sont soumis à des déformations et des contraintes qui ne s'exercent pas sur les matériaux plastiques ordinaires. C'est d'ailleurs, après tout, leur raison d'être.

Introduction

Résine synthétique + verre textile = plastique armé

Le plastique armé est un matériau composite, formé de résines synthétiques armées généralement de fibre de verre textile.

La combinaison de renforts aux résines moulables sous faible pression a fait du plastique armé un matériau apte à remplacer les matériaux traditionnels dans beaucoup de cas. En particulier, il peut servir dans les applications extrêmes où il est nécessaire d'obtenir un bon rapport résistance/poids, des qualités mécaniques élevées ainsi que des propriétés d'isolation électrique, thermique ou acoustique. Il offre une parfaite résistance à la dégradation par les éléments naturels et la plupart des agents chimiques. Enfin, son prix de revient est intéressant, même dans le cas de productions en petite série.

Le matériau est créé par le fabricant en fonction des besoins définis par l'utilisateur. Le fabricant ajuste les produits de renforcement et les résines liantes, réalisant ainsi un matériau « sur mesure ». Il choisit son procédé de fabrication en fonction de l'importance de la série à réaliser.

La résine assure la cohésion du plastique armé

Le rôle essentiel de la résine est de servir de liant au renfort. Elle l'enrobe et assure la transmission des forces entre les fibres. Pour assurer une liaison entre la résine et le renforcement, il existe des produits de pontage, propres à chaque type de plastique armé.

La résine doit être choisie en fonction de la sollicitation supportée par le plastique armé, auquel elle confère une cohésion dont dépend sa tenue dans le temps. La résine assure aussi l'étanchéité du matériau.

Jusqu'à maintenant, le plastique armé est réalisé essentiellement à l'aide de résines thermodurcissables. Il existe plusieurs variétés de résines qui ont chacune des propriétés bien caractéristiques. La plus couramment utilisée pour le plastique armé est la résine polyester. Le fabricant doit choisir parmi ces variétés de résines celle qui est la mieux adaptée à une application déterminée.

Le renfort de verre textile, une résistance de 380 MPA

Le verre textile utilisé dans le renforcement des matières plastiques présente d'excellentes caractéristiques mécaniques. Sa résistance à la traction est de l'ordre de 380 MPA. Ses qualités électriques sont également élevées. Il se présente essentiellement sous trois formes :

---

* *M. Germain Bélanger, diplômé de Polytechnique en 1966, est consultant dans le secteur des matériaux plastiques. Il a œuvré uniquement dans le domaine des plastiques depuis 14 ans ; l'an dernier il recevait de la Société des Industries du Plastiques du Canada le prix Canplast pour son leadership exceptionnel et sa contribution soutenue à l'industrie canadienne du plastique. Il a présenté plusieurs conférences techniques au niveau international, le tout combiné à des publications et brevets dans le domaine des matériaux plastiqués. De plus, il est le président fondateur de Polynergie, compagnie œuvrant dans le domaine des énergies renouvelables et associée au Centre Québécois d'Innovation Industrielle.*

- Les stratifils (connus aussi sous l'appellation anglo-saxonne de « Roving ») résultent de l'assemblage sans torsion d'un certain nombre de fils continus (silicone).
- Les mats de verre sont des feutres de fils coupés agglomérés par un liant ou liés mécaniquement. Ils servent à réaliser des plastiques armés présentant des résistances mécaniques isotropes (sans orientation préférentielle).
- Les tissus existent dans une gamme très variée. Ils diffèrent entre eux par les types de fils de verre qui les composent, leur poids au mètre carré et les traitements qu'ils ont subis.

Caractéristiques générales du plastique armé

Les constituants du plastique armé : choisis et dosés pour chaque application

Le plastique armé est constitué d'une résine synthétique enrobant un renforcement généralement de verre textile, dans des qualités, des présentations et des techniques d'emploi adaptées à chaque problème. Il est « plastique » et peut donc prendre toutes les formes désirées. Il est « armé », et offre les qualités de résistance d'une solide ossature.

L'apparence du matériau

C'est un matériau rigide, translucide ou opaque, coloré si besoin dans la masse. Ses techniques de moulage (contact, projection, emboutissage, embobinage...) permettent d'obtenir des formes et des dimensions extrêmement diverses.

Propriété physique no. 1 du plastique armé : sa densité de 1,5 à 2

Le plastique armé est quatre fois plus léger que l'acier. Sa stabilité dimensionnelle est remarquable. Sa conductibilité calorifique est très faible (300 fois moins que l'acier, ou 1,700 fois moins que le duralumin).

Propriété mécanique no. 1 du plastique : sa résistance exceptionnelle

Le tableau ci-dessous est caractéristique des performances que l'on peut attendre du plastique armé.

TABLEAU DES RÉSISTANCES COMPARÉES :

Résistances mécaniques du plastique armé	Résistance à la traction	Résistance à la flexion
Moulage au contact	96 MPA à 138 MPA	138 MPA à 207 MPA
Enroulement filamentaire	380 MPA à 1175 MPA	380 MPA à 587 MPA

Propriété chimique no. 1 du plastique armé : son insensibilité à la corrosion

Le plastique armé est insensible à la dégradation causée par les éléments naturels et la plupart des agents chimiques.

Les propriétés diélectriques du plastique armé en font un excellent isolant électrique

Ces caractéristiques remarquables font du plastique armé le matériau des performances hors série... en série !

Le plastique armé dans la chaudronnerie

L'utilisation de ce matériau est de plus en plus répandue dans la chaudronnerie. Le plastique armé répond, en effet, aux différents problèmes qui se posent à cette industrie : résistance à la corrosion, bonnes caractéristiques mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de toutes dimensions et de formes les plus compliquées, légèreté facilitant les manipulations.

Le plastique armé dans l'entreposage et le transport de produits chimiques

Les problèmes de stockage, de manutention et de transports de produits chimiques dans l'industrie trouvent des solutions nouvelles grâce au plastique armé.

L'exceptionnelle résistance à la corrosion du matériau permet de l'utiliser avec les produits les plus actifs. Son cœfficient d'isolation thermique très élevé le recommande dans tous les cas où la conservation exige le maintien des températures données ou une bonne protection contre les variations climatiques.

Enfin, sa légèreté alliée à son excellente résistance mécanique lui ouvrent largement le domaine des transports.

Le gain de poids permet l'augmentation des capacités transportées, l'entretien est réduit au minimum. Ainsi, le plastique armé est de plus en plus utilisé dans la fabrication de citernes sur véhicules, de semi-remorques autoportantes, de containers (rail, routes), de wagons, de bacs de manutention, etc.

Le plastique armé dans l'épuration, la déminéralisation, le dépoussièrage et le traitement des eaux

Ces différents domaines trouvent dans le plastique armé un matériau particulièrement apte à résister à la corrosion, qu'il s'agisse de gaz ou de liquides.

Les différentes techniques de mise en œuvre du plastique armé, ses composants variés, permettent de réaliser des tuyaux, des colonnes, des tours, des épurateurs, des cyclones, etc.

La légèreté du matériau (pour une bonne résistance mécanique) facilite considérablement l'installation des pièces les plus volumineuses et des formes les plus compliquées.

Le plastique armé dans la ventilation

Qu'il s'agisse d'aspirer, de refouler ou d'évacuer des gaz, des fumées ou des liquides à forte teneur de pro-

duits corrosifs, le plastique armé résiste remarquablement à la plupart des produits chimiques, tout en restant insensible aux agents atmosphériques.

Par ailleurs, il ne subit pas de déformation grâce à sa résistance mécanique élevée ; il autorise les formes les plus complexes ; enfin, sa légèreté est exceptionnelle. Ces qualités, jointes à une mise en œuvre facile, le font apprécier dans les domaines suivants : cheminées, gaines, tuyaux pour transports de fluides, registres, hottes d'aspiration, capotages et pièces de protection.

Le plastique armé s'emploie également pour la réalisation de réacteurs, de ballons à pression (notamment de pièces à vide), de vis sans fin, etc.

Avantages du plastique armé dans le génie chimique

- remarquable résistance à la corrosion et aux agents atmosphériques, limitant les servitudes d'entretien et apportant une grande longévité ;
- facilité d'épouser les formes les plus compliquées ;
- hautes qualités mécaniques facilitant le transport et le montage ;
- excellent cœfficient d'isolation thermique ;
- stabilité dimensionnelle ;
- grande légèreté (densité 1,8).

Les plastiques armés dans l'industrie de la pâte à papier

Donnons d'abord un aperçu de ce qui se passe dans l'industrie du papier en mentionnant les équipements qui ont pu y être mis en place. Les applications, caractéristiques qui ont justifié l'emploi des plastiques armés sont les suivantes :

1) – Systèmes de ventilation
2) – Hottes sur les laveurs à pâte écrue.
3) – Canalisations de chlore.
4) – Hottes sur les bacs à extraction.
5) – Générateurs à hypoclorite.
6) – Hottes sur les laveurs à hypochlorite
7) – Tour de prérétention du dioxyde de chlore
8) – Systèmes de ventilation d'évacuation
9) – Évacuation des eaux usées.

Ceci, bien entendu, dans le cas du procédé au sulfate, mais il faut noter qu'il existe des applications analogues lorsque sont utilisés d'autres procédés de fabrication de la pâte.

Fosses de décharge

La formation des fumées au niveau des fosses de décharge (blow pits) peut varier avec le procédé, mais en général, les gaz sont composés de vapeur, d'eau, d'air et de dioxyde de soufre avec des traces possibles d'acides formique et acétique et de sels de sodium, de magnésium, d'ammonium et de calcium. Ceci constitue une aire idéale d'application pour les plastiques armés, d'autant plus qu'ils peuvent supporter le contact avec ces produits jusqu'à des températures élevées.

Une très bonne illustration des aptitudes des plastiques armés est donnée par l'importante installation de captage de fumée installée en 1961 à l'Hammermill Paper Co. Les conduits véhiculent les gaz (vapeur d'eau SO_2 et traces d'acides acétique et formique) des fosses de décharge à leur tour de condensation. La température s'y maintient à 100°C pendant 30 minutes toutes les heures et demie. Les spécifications de cette installation prévoyaient une résistance à des pressions allant de 33 cm d'eau à un vide atteignant également 33 cm d'eau.

Hottes sur les laveurs

Après macération, la pâte est généralement lavée dans des laveurs rotatifs sous vide afin d'éliminer les excédents de produits chimiques. Comme dans le cas précédent, la nature des fumées corrosives à évacuer varie avec le procédé utilisé, mais d'une manière générale on peut dire qu'en gros, elles ont une composition identique à celles des fosses de décharge.

Les plastiques armés sont largement utilisés pour la construction des hottes d'aspiration et ont déjà dans une large mesure remplacé les installations en amiante-ciment. Ces matériaux peuvent aussi être utilisés pour la réalisation des conduits, cheminées, etc.

L'Alaska Lumber and Pulp Company, de Sitka, en Alaska, a installé en 1958 une série de ces hottes d'aspiration. Elles ont une largeur de 8 mètres et des longueurs variant entre 15 et 70 mètres.

Ces gaines transportent des vapeurs très corrosives d'hydroxyde de magnésium avec des traces du même chlorure à des températures allant de 60° à 65°C.

Installation de blanchiment

Les produits très corrosifs utilisés pour le blanchiment de la pâte ouvrent un vaste champ d'application pour les plastiques armés résistant à la corrosion dans ce domaine, d'autant plus que le nombre élevé de produits différents utilisés nécessite l'emploi d'un matériau de construction polyvalent.

Le blanchiment étagé, en particulier, comporte deux stades hypochlorites, un stade chloruration, suivi à nouveau par des stades hypochlorites.

Les plastiques armés sont compatibles avec la plupart des agents de blanchiment utilisés :

- Chlore – sec
- Chlore – humide
- Hypochlorite de sodium 15%
- Hypochlorite de calcium 20%
- Dioxyde de chlore 15%
- Hydrosulfite de zinc
- Eau oxigénée 30%
- Chlorite de sodium 50%

Canalisations pour chlore

Dans les usines de pâte à papier où l'on procède à l'élaboration du chlore ou de l'hypochlorite, les plastiques armés ont aidé à résoudre un certain nombre de problèmes de corrosion, particulièrement celui que pose la manipulation du chlore humide.

Hottes sur extracteurs

Dans le cas du blanchiment étagé, le stade de la chloruration de la pâte est suivi par une extraction alcali-

ne, avec des solutions d'hydroxyde de sodium et à température modérée.

La société Consolidated Paper a installé des hottes en plastique armé dans cette zone d'extraction ; ces hottes mesurent 3 m × 6 m ; elles ont coûté 75% d'une hotte en alliage traditionnel.

Générateur à hypochlorite

Une autre société a installé un générateur et un réservoir d'entreposage à hypochlorite en plastique armé. Le réservoir cylindrique a un diamètre de 2 m. et une hauteur de 4 m ; il a été fabriqué en réunissant trois sections cylindriques. Au cours du procédé, la solution de soude est pompée dans le réservoir, elle subit ensuite un barbottage dans le chlore, ce qui la convertit en une solution à 15% d'hypochlorite. La température à l'intérieur du réservoir demeure celle de l'ambiance. La cuve en acier caoutchouté précédemment utilisée n'a duré que cinq ans.

Réservoir d'entreposage d'hypochlorite

Une autre firme a installé une cuve d'entreposage de solution d'hypochlorite qui a été construite sur place, à l'intérieur de l'usine, la dimension des portes ne permettant pas son introduction dans les ateliers. C'est après quelques études préalables que le choix entre une cuve en acier revêtue de PVC et une cuve en plastique armé a été fait, conduisant à une économie de 35% dans l'achat du matériel.

Canalisations d'égouts

Un fabriquant a installé un égout d'une longueur totale de 5000 mètres, en remplacement d'une ancienne canalisation en acier protégée par un revêtement bitumineux. Cet égoût sert à l'évacuation d'environ 250,000 *l.* à la minute de solution épuisée provenant de la fabrication de la pâte à papier par le procédé au sulfate.

Des canalisations analogues sont utilisées pour l'évacuation des liqueurs résiduaires de blanchiment, des vapeurs émises dans ces cuves où sont entreposées ces liqueurs, ainsi que pour le transport de solutions épuisées vers les installations où sont récupérés les produits utilisables qu'elles contiennent.

Les avantages des plastiques armés dans l'industrie de la pâte à papier

Il est possible de trouver, par un examen approfondi des usines, d'autres applications où l'emploi de ces matériaux présente des avantages qui découlent de leurs principales caractéristiques :

1) — Résistance à la corrosion
2) — Faible poids
3) — Rapport résistance/poids élevé
4) — Faible dépense d'installation et d'entretien
5) — Translucidité
6) — Bonne qualité d'isolation thermique et électrique.

La résistance à la corrosion est une des raisons principales de l'emploi des plastiques armés, et il est intéressant d'examiner cette question dans le détail.

Pourquoi les plastiques armés donnent-ils satisfaction, là où l'acier inoxydable ou les alliages spéciaux ne conviennent pas ?

Les plastiques armés se corrodent ou se dégradent d'une autre manière que les métaux. Ceux-ci subissent la corrosion du fait de leur instabilité naturelle à l'état raffiné. Cette attaque est électrochimique et la corrosion est usuellement définie en mm/par an, ce qui représente l'épaisseur du métal « consommé » ou attaqué par an.

Les plastiques armés, par contre, ou bien résistent à l'ambiance corrosive, ou bien ne conviennent pas. Mais dans tous les cas, il n'y a pas réduction graduelle de l'épaisseur du matériau.

Le mécanisme principal de l'attaque des plastiques armés et particulièrement des polyesters, est l'hydrolyse. L'aptitude à l'hydrolyse de ces résines varie avec leur type.

Les producteurs possèdent maintenant tous les renseignements nécessaires sur la résistance chimique de leurs résines.

Le prix des plastiques armés est aussi un facteur favorable auquel s'ajoute, en général, des frais d'installations moins élevés, du fait du poids moindre de ces matériaux. De toute façon, dans une étude comparative de prix de revient, il ne faut pas manquer de faire intervenir la durée de service assurée par un matériel en plastique armé et les réductions de frais d'entretien que son emploi permet de réaliser.

En général, on peut dire qu'à l'achat, les matériaux plastiques coûtent le tiers ou la moitié de l'acier inoxydable et sont sensiblement moins onéreux que certains alliages spéciaux comme l'Inconel ou l'Hastelloy. Par contre, l'acier ordinaire peut être moins coûteux, mais il aura besoin d'un revêtement protecteur.

En outre, un autre facteur intervient en faveur des plastiques armés : les méthodes de fabrication bénéficient de progrès incessants. Alors que ce genre d'application a pendant longtemps été manuelle, on fait aujourd'hui de plus en plus appel à des procédés automatiques et ce fait, joint au développement du tonnage de pièces fabriquées, est également un facteur d'économie. Enfin, indiquons qu'il est relativement facile de former le personnel d'entretien, ce qui assure une plus grande sécurité aux utilisateurs.

Caractéristiques et propriétés d'une tuyauterie de plastique armé

Le tuyau de plastique armé à la fibre de verre est léger, très résistant à la corrosion, et son fini glacé intérieur prévient les accumulations ou dépôts en plus de réduire le cœfficient de friction. Ce minimum de friction se réflète par une augmentation de la vitesse d'écoulement et une réduction des coûts d'entretien pour les unités de pompage. Le poids d'un tuyau de plastique armé représente 25% de celui d'un tuyau d'acier tout en étant dix fois plus flexible, facteurs importants pour les installations en terrain marécageux.

Le tuyau est fabriqué en grandes quantités par le procédé d'enroulement filamentaire. Des mandrins d'acier ultra polis sont enrobés de filaments de fibre de verre continu, imprégnés de résine thermodurcissable. L'angle de bobinage et la vitesse sont contrôlés électroniquement pour permettre une construction balancée.

Lorsque le tuyau a été complètement bobiné, il est transféré dans un four pour permettre le durcissement de la résine. Ensuite le mandrin est extrait mécaniquement et retourné à la chaîne de fabrication. Le tuyau passe ensuite aux étapes d'usinage, de finition et d'inspection.

Les tuyaux sont fabriqués en longueur standard de 7 m. De plus courtes longueurs peuvent être fournies sur demande. Les longueurs excédant 7 mètres sont préassemblées à l'usine.

En général les tuyaux sont disponibles en diamètres variant de 2 cm à 75 cm. Une variété complète entre ces deux limites est possible.

Toute la tuyauterie est calculée en utilisant un facteur de sécurité de 5 basé sur la pression d'opération maximum recommandée ; cette tuyauterie résiste à une pression extérieure de deux fois la pression atmosphérique.

Un assortiment complet de tés, coudes, réducteurs, et autres peut être fourni en plastique armé à la fibre de verre. Ces accessoires possèdent les mêmes caractéristiques mécaniques que les tuyaux pour assurer une structure équilibrée.

Résistance à la corrosion

Le tuyau de plastique armé est résistant à une très grande variété de solutions acides, alcalines et autres. Il est de plus résistant aux produits pétroliers comme l'essence. Son fini extérieur permet de le déposer dans des sols fortement corrosifs sans protection cathodique.

Légèreté

Le poids du tuyau de plastique armé possède l'avantage considérable de ne pas nécessiter l'utilisation de pièces d'équipement lourd avec mât et treuil arrière sur le site d'installation. Par exemple, un tuyau de 15 cm de diamètre, 7 m de longueur, opérant à une pression de 2.5 MPa par cm² pèse environ 35 kg et peut être manutentionné par deux hommes.

Flexibilité

Le tuyau de plastique armé est dix fois plus flexible que l'acier et par conséquent peut subir de grandes déformations tout en ne subissant que de faibles contraintes. Son installation en sol difficile s'en trouve facilitée, l'assemblage pouvant s'effectuer en surface avant de procéder à la pose au fond de la tranchée.

Chocs et vibrations

Les propriétés de résistance à la fatigue sont très peu affectées par l'effet de concentration de contraintes autour des entailles. La disposition des fibres de verre prévient leur propagation. Le tuyau de plastique armé s'utilise très bien là où la pression agit par pulsations comme dans le cas du phénomène de marteau, et là où les vibrations à haute fréquence sont communes (tuyaux reliés aux stations de pompage).

Propriétés d'écoulement

La résistance à la corrosion et le fini glacé (20 à 40 micro/cm) des tuyaux de plastique armé minimise l'accumulation des dépôts et assure un cœfficient de friction très bas pour la vie entière du tuyau.

Le cœfficient Hazen William est de l'ordre de 150. Une perte de charge de 15 cm d'eau par 30 m de tuyau résulte d'un écoulement de 900 litres par minute d'eau à 20°C dans un tuyau de 25 cm de diamètre. Sur une longueur de 1 500 m, la perte totale se monte à 7,5 m d'eau ou 7,4 KPA, ce qui est très peu comparativement à l'acier.

Conductibilité thermique

Le cœfficient est de l'ordre de 1.5 BTU/hre/°F/pi²/pce, soit 100 fois moindre que l'acier. C'est là un avantage marqué pour l'utilisation à l'intérieur du béton dans le transport des fluides à température variable.

Réservoirs d'entreposage en plastique renforcé

Les matières plastiques possèdent dans le domaine des récipients un attrait particulier. Leur faible poids spécifique, allié à de bonnes caractéristiques mécaniques et chimiques en font, par définition, des matériaux très intéressants pour l'emballage sous ses formes diverses.

L'industrie, consciente des vastes possibilités du matériau dans le domaine de l'entreposage, a mis au point et développé une forme originale de construction qui utilise au maximum les caractéristiques des constituants.

Les citernes sont réalisées selon un procédé d'embobinage de fibres de verre équitendues et de résine polyester, enserrant une âme sandwich en mousse de polyuréthanne.

Ce procédé permet d'utiliser au mieux les possibilités des plastiques armés.

Les avantages des citernes en plastique armé

Les citernes fabriquées selon le procédé d'enroulement filamentaire présentent un ensemble de caractéristiques :

Légèreté

La densité des plastiques renforcés varie entre 1,5 et 1,8. Ce faible poids spécifique permet des gains de l'ordre de 10 à 15% par rapport aux cuves en acier.

Résistance mécanique

Les procédés de fabrication par embobinage permettent d'obtenir des plastiques renforcés dont la résistance est tout à fait remarquable. Une caractéristique importante réside dans le fait que, chez ces matériaux, la

limite de déformation élastique se confond avec celle de rupture ; en d'autres termes, ils ne sont pas sujets à des déformations permanentes : une citerne accidentée ne se déforme pas.

Ces caractéristiques mécaniques élevées permettent la mise en place de ces réservoirs en plein vent, d'où facilité de mise en place et gain appréciable de la surface couverte. Comme par ailleurs le cylindre est réalisé en une seule pièce, on supprime les risques de corrosion intergranulaire ou fissurante au niveau des soudures ; phénomènes que l'on rencontre sur les citernes en acier, soumises à des régimes vibratoires.

Résistance à la corrosion

Du fait même de leur nature chimique, les plastiques renforcés ne donnent pas lieu aux phénomènes de la corrosion électrochimique. Ainsi l'entretien de ces citernes se réduit aux seuls soins de propreté. Par ailleurs, cette résistance à l'action des agents chimiques ouvre à ces citernes un large éventail de possibilités d'emploi.

Isothermie

Les parois des réservoirs sont constituées d'un plastique armé (K = 1.5) et d'une âme en mousse de polyuréthanne (K = 0.14) qui confèrent à l'ensemble de la structure une très bonne isolation. Contrairement aux métaux (acier K = 312, aluminium K = 1860), le plastique armé ne transmet pas la chaleur. Cette notion est très importante pour les produits devant être entreposés à basse ou haute température. Dans tous les cas, on peut diminuer, voire même supprimer de façon appréciable, les apports extérieurs de chaleur et de froid, ce qui a toujours une influence sur le bilan d'exploitation. Ce pouvoir isolant autorise, par ailleurs, à exposer ces réservoirs aux conditions atmosphériques.

INFLUENCE DES PLASTIQUES SUR LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE *(STATISTIQUES EN PROVENANCE DES ÉTATS-UNIS)*

VALEUR DU PRODUIT FINI

% de pétrole utilisé pour la fabrication des matières plastiques — 1.5%

PRINCIPALES COMPOSANTES

1978

Emballage	— 3.5 millions tonnes (métriques)
Construction	— 3.2 millions tonnes (métriques)
Transport	— 900,000 tonnes métriques
Électricité	— 800,000 tonnes métriques
Produits ménagers	— 650,000 tonnes métriques
Meubles	— 475,000 tonnes métriques

4,5 l de benzène coûte 1,50$ et sert à produire pour 3,00$ de résine polystyrène.

450 g de résine polystyrène servent à produire pour 5,00$ de produits finis.

ISOLATION DE BÂTIMENTS (1977)

Mousse de plastique utilisée	— 155,000 tonnes
Nombre de maisons isolées	— 177,000
Consommation estimée sans isolation de mousse plastique	— 16.5 trillions BTU
Consommation réelle avec isolation	— 3.4 trillions BTU
Économie de	— 13.1 trillions
Équivalent de	— 13.1 millions de barils de pétrole

CONSOMMATION VS ÉCONOMIE

CONTENANTS DE PRODUITS CHIMIQUES UTILISÉS DANS LES FOYERS (1977)

Volume de contenant plastique	— 7.3 billions
Volume de contenant en verre	— 4.9 billions
Volume de contenant en métal	— 5.7 billions
Énergie consommée pour les contenants en plastique	— 29 trillions BTU
Énergie équivalente requise pour une production de remplacement entre le métal et le verre	— 44.9 trillions BTU
Économie de	— 15.9 trillions BTU
Équivalent de	— 2.7 millions de barils de pétrole

AUTOMOBILE (1978)

Réduction de poids d'une automobile	— 400 livres
Augmentation de la distance parcourue	— 1 mille/gallon
Effet de la réduction de poids des automobiles suite à l'utilisation des plastiques	— Économie de 80.5 trillions BTU annuellement ou l'équivalent de 14,000,000 barils de pétrole

DÉFLECTEUR D'AIR POUR CAMION

Poids de l'unité — 52 livres

Économie d'énergie — 10% de l'essence (rapport C.N.R. Ottawa)

En assumant que 80% des camions seraient équipés (USA) de cet unité

— consommation sans déflecteur	— 1326 trillions BTU
— consommation avec déflecteur	— 1220 trillions BTU
économie	106 trillions BTU
équivalent	18,000,000 barils de pétrole

CHANGEMENTS PRÉVUS AU NIVEAU DES MATÉRIAUX POUR UNE VOITURE MOYENNE GM 1978-1987 * A

Matériau	livres 1978	livres 1987	% de changement
Plastiques	189	255	+ 35
Aluminium	121	180	+ 49
Acier	2066	1687	– 18
Fonte	625	283	– 55
Caoutchouc	99	81	– 18
Verre	95	79	– 17
Plomb	22	22	0
Zinc	18	9	– 50
Autre * *B*	264	210	– 20
total	3499	2816	– 20

* *A — informations provenant de General Motors*

* *B — sont inclus le cuivre et différents matériaux non métalliques tel les tissus, les fluides, graisses, huiles etc.*

UTILISATION DES MATÉRIAUX PLASTIQUES DANS UNE (GM) VOITURE 1978 (*A)

PLASTIQUE	POIDS UTILISÉ
Polypropylène	44
Polyuréthanne	43
PVC	26
Polyester	17
ABS	19
Polyéthylène	11
Nylon (*B)	5
Phénolique	4
Autre	7
Acrylique	4
TOTAL :	180 livres

* *A — Information du (SPI) Society of Plastics Industry*

* *B — sauf les pneus*

Les fibres haut module pour applications à haute performance

L'un des problèmes de l'industrie des plastiques renforcés est d'arriver à rapprocher les caractéristiques obtenues par les procédés industriels de moulage et les valeurs qu'on pourrait espérer obtenir d'après les performances des matières de base.

POTENTIEL D'ÉCONOMIE DE POIDS AVEC LES MATÉRIAUX PLASTIQUES

	poids en livres		
Composante	Métal	Plastiques	Gain
Capot moteur	35	18	17
Porte	35	16	19
Capot de valise	25	13	12
Renfort latéral de porte	variable	variable	1.5 à 10
Pare-chocs (2)	80	40	40
Réservoir à essence	variable	variable	12 (estimé)
Bras de suspension	variable	variable	18 (estimé)
Ressort à lame (1)	28	5 à 7.5	21.5 à 23
Roue (4)	120	≈60	≈60
Arbre de transmission	53	28	25

Dans l'utilisation de la fibre de verre comme renforcement, ces dernières années, le bobinage est apparu comme le procédé permettant de tirer le maximum des possibilités des matières de base. Les diverses techniques de tissage ont été employées de façon extensive pour résoudre une grande partie des difficultés de mise en œuvre et, appuyées par la technique de préimprégnation, elles ont permis l'élaboration de matières premières pratiques et de qualité constante pour l'utilisateur. Mais les différentes manipulations que les fils subissent lors des opérations de tissage et de mise en œuvre, les pertes de résistances dûes aux entrecroisements de fils qui finissent pas se cisailler entre eux, font que l'efficacité des produits tissés est limitée.

L'amélioration des caractéristiques des fibres de renforcement et l'apparition notamment des fibres à haut module d'élasticité : carbone, graphite, bore, etc. pose à nouveau les questions de la facilité de mise en œuvre et de l'efficacité pour l'utilisateur.

A) La fibre de carbone

Depuis 10 ans, l'intérêt des fibres de carbone à module élevé n'a cessé de grandir. Et c'est avec optimisme que l'on envisage l'avenir des matériaux composites employant ce nouveau renforcement. Le marché des matériaux composites renforcés de fibres de verre est bien établi. Sa progression est environ de 15 à 20% par an dans les pays industriels. Les efforts réunis des fabricants de fibres de verre et des fournisseurs de résines ont permis d'obtenir de nombreux renseignements et des données techniques sur la technologie des fibres de verre, ce qui permet aux ingénieurs de les utiliser avec confiance dans la plupart des matériaux composites.

La possibilité de fabriquer des structures en employant en même temps des fibres de carbone est intéressante relativement au coût, à la résistance aux ultraviolets, et pour les excellentes caractéristiques techniques.

TABLEAU I

Comparaison des propriétés des fibres de verre et des fibres de carbone.

	Fibre de verre verre « E »	Fibre de carbonne « module élevé »
Poids spécifique	2,54	2.00
Résistance en traction GN/m_2	1,7 — 1,9	1,8 — 1,9
Module d'Young GN/m_2	65	400
Pourcentage de contrainte ultime	3,0	0.5
Expansion thermique à 100°C « $C^{-1} \times 10^{-6}$ »	10	— 1,2

Comparaison des renforcements :

Le tableau I montre une comparaison de certaines propriétés des fibres de carbone et des fibres de verre.

La différence la plus importante entre les fibres de verre et les fibres de carbone est leur module qui varie de 3,5 à 5,5 et même plus. Si nous comparons la rigidité spécifique, la différence est de 5,8 ou plus. Les fibres de carbone de module élevé sont spécifiquement sept fois plus rigides que l'acier.

En ce qui concerne la résistance à la traction, certaines fibres de verre peuvent avoir une plus grande résistance que les fibres de carbone courantes. L'allongement final relatif des fibres est sans doute la différence la plus importante.

Comparaison des propriétés des matériaux composites :

Dans un matériau composite, les qualités qui importent ne sont pas celles de la fibre qui le renforce, mais ses propres qualités.

Le tableau II compare certaines propriétés des fibres de carbone et des fibres de verre en se servant comme base de comparaison d'éléments comportant 60 % en volume de fibres disposées à un axe dans un système conventionnel de résine époxy.

Rigidité :

Un exemple qui sera certainement très intéressant dans l'avenir est celui de l'utilisation de poutres de section « I » ou rectangulaire pour la construction de ponts ou de poutres pour toitures. Le tableau III donne les indications comparatives entre les poutres en fibres de carbone à un axe et les poutres d'acier. Le tableau indique les flexions au centre dues uniquement au propre poids de la poutre.

B) La fibre de bore et de carbure de silicium

Les fibres de bore et de carbure de silicium ont en commun la méthode d'élaboration et le mode d'exploitation des essais mécaniques.

TABLEAU II

Comparaison des propriétés de structures composites unidirectionnelles en verre et en carbone

	Fibre de verre	Fibre de carbonne
	60% en poids de résine époxy	60% en poids de résine époxy
Résistance en traction GN/m^2	1,1 — 1,4	1,1 — 1,3
Module de tension GN/m^2	42,0	200
Pourcentage de contrainte ultime	1,1 — 1,2	1,2 — 1,4
Module de flexion GN/m^2	42,0	200
Expansion thermique 100°C $°C^{-1} \times 10^{-6}$		
parallèle à l'axe des fibres :	10,0	— 1,2
perpendiculaire à l'axe des fibres :	10,0	49,5
Conductivité thermique K $W/m^{-1}/°C^{-1}$		
parallèle à l'axe des fibres :	0,50	64,9
perpendiculaire à l'axe des fibres :	0,50	1,38

TABLEAU III

Comparaison des poutres renforcées d'acier et de fibre de carbone

	Poids total	Fléchissement au milieu
Poutre d'acier I 6" x 3½" 20 pi. de portée	105 kg	0.0649 po.
Poutre d'acier I 8" x 4" 30 pi. de portée	255 kg	0.1871 po.
Poutre d'acier 8" x 3" x ¼" 20 pi. de portée	143 kg	0.0917 po.
Poutre d'acier 8" x 4 x ¼" 30 pi. de portée	291 kg	0.2498 po.
Poutre I en fibres de carbone 6" x 3½" 20 pi. de portée	26,5 kg	0.0178 po.
Poutre I en fibres de carbone 6" x 3½" 30 pi. de portée	39 kg	0.0524 po.
Poutre I en fibres de carbone 8" x 4" 30 pi. de portée	58,5 kg	0.0515 po.
Poutre en fibres de carbone 6" x 3" x ¼" 20 pi. de portée	33 kg	0.0249 po.
Poutre en fibres de carbone 8" x 4" x ¼" 30 pi. de portée	39 kg	0.0524 po.

Ces fibres sont obtenues par un dépôt en phase gazeuse sur un subtrat chaud. Le dépôt s'effectue sur un fil de tungstène. Après obtention le fil est enroulé sur une bobine. Le diamètre final est de l'ordre de 100, la longueur étant égale à plusieurs milliers de mètres.

Les caractéristiques mécaniques de ces filaments sont principalement obtenues à l'aide d'essais de traction. Les courbes contraintes-allongement sont rigoureusement linéaires, mettant en évidence un comportement strictement élastique. Des mesures au cathétomètre donnent une valeur égale à 40,000 hbars pour les filaments de bore et de 45,000 hbars pour les filaments de carbure de silicium.

Les filaments de bore conservent de bonnes propriétés jusqu'à 400°C. La résistance à la rupture chute ensuite entre 400°C et 600°C.

Au contraire les caractéristiques mécaniques des filaments de silicium varient peu jusqu'à 1000°C, cette température étant la température maximale d'essai.

En vue de leur incorporation dans une matrice, les caractéristiques à retenir pour le choix d'une fibre sont en premier lieu les propriétés mécaniques ; rappelons que le module d'Young des fibres de bore est 5 fois plus élevé que celui des fibres de verre.

Mais le choix de ces fibres doit également tenir compte de leur stabilité thermique et de leur compatibilité vis-à-vis d'une matrice :

– Les filaments de carbure de silicium possédant une grande stabilité thermique sont destinés plus particulièrement à être incorporés dans une matrice métallique ; les filaments de bore, moins stables à chaud mais de densité plus faible (d = 2,7 au lieu de 3,2), sont généralement incorporés dans des matrices de résine.

Conclusion

Depuis quelques années, l'utilisation de matières plastiques a augmenté à un rythme constant et rapide, malgré le manque d'informations techniques sur ce matériau. On l'a surtout utilisée sous forme d'habillage ou de coquille de revêtement, puisqu'elle peut prendre d'innombrables formes et que sa production dimensionnelle est facile. Dans certains cas, de plus, on s'en est servi pour imiter ou simuler un produit traditionnel (bois incrusté, composante de meubles).

Grâce à ces premiers succès des matières plastiques, il a été possible d'envisager la réalisation de composants particulièrement complexes comme ceux qui entrent dans la formation de certaines structures. Cependant, le potentiel de ce matériau n'a été qu'effleuré.

La variété d'applications réalisées a permis de préciser les défauts et les avantages des plastiques et, s'il n'en tient qu'a l'architecte et l'ingénieur, l'avenir s'annonce prometteur, ces derniers étant continuellement à la recherche de solutions différentes, nouvelles et améliorées.

RÉFÉRENCES

1. John H. MALLISSON, *Chemical Plant Design with Reinforced Plastics*, Mc Graw-Hill Book Company.
2. A. DE DANI, *Plastiques renforcés aux fibres de verre*, Eyrolles 1966
3. MOHR, OLESSKY, MEYER, SHOOK, *S.P.I. Handbook of Technology and Engineering of Reinforced Plastics Composites*, Edition Van Nostrand Reinhold Company.
4. Eric BAER, *Engineering Design for Plastics*, Van Nostrand Reinhold Company
5. *Reinforced Plastics the Revolution of 1976*, 31st Annual Conference 1976, The Society of Plastics Industry Inc.
6. *Discover Reinforced Plastics*, 32nd Annual Conference 1977, The Society of Plastics Industry Inc.
7. *Reinforced Plastics Contact 1978*, 33rd Annual Conference 1978, The Society of Plastics Industry Inc.
8. *Reinforcing the Future*, 34th Annual Conference 1979, The Society of Plastics Industry Inc.
9. *Rising to the challenge*, 35th Annual Conference 1980, The Society fo Plastics Industry Inc.

Progrès dans la technologie des composites :

Les composites thermoplastiques haute performance

L. POST - *Ten Cate Glas BV*
W.H.M. DREUMEL - *Delft University of Technology*

L'utilisation des composites haute performance s'accroit considérablement en raison de leur fiabilité et de leur bon rapport coût/performance. De nombreux produits sont réalisés aujourd'hui avec ces matériaux dans des domaines aussi variés que l'aviation, la médecine, l'armement, le sport, l'électronique...

L'utilisation de tissus et nappes préimprégnés se développe de plus en plus pour les applications hors aéronautiques. Cependant, l'emploi de préimprégnés thermodurcissables nécessite la connaissance d'une technique de fabrication complexe. Un effort de recherche important est effectué de nos jours afin d'en faciliter l'emploi. Cette présentation met l'accent sur l'utilisation des composites thermoplastiques qui offrent de nombreux avantages :

- procédé propre
- mise en œuvre rapide
- haute résistance aux chocs
- assemblage ne demandant pas d'utilisation d'adhésifs
- émanation non toxique

Introduction

Comme le montre la figure n 1, l'utilisation de fibres renforcées haute performance peut prétendre à un avenir prometteur. Ce graphique compare la consommation européenne de fibres de carbone avec les prévisions établies jusqu'en 1985. Il montre une croissance réelle quelque peu limitée. Cette étude analyse donc quelques aspects de ce développement hésitant et présente une nouvelle technique qui s'adapte mieux aux exigences technologiques.

Les composites dans l'aéronautique

Bien que le développement des applications des composites n'ait pas atteint les prévisions, de nombreux composants sont fabriqués en matériaux composites. Le schéma 2 montre l'utilisation des composites dans les nouveaux Fokker F5 et F100. Un pourcentage important des éléments de cellule dans l'aéronautique civile est constituée de fibres composites avancées. Le graphique 3 montre que les composites entrent pour 10 % du poids total de la structure. Une série d'appareils qui sont de plus en plus équipés de composites est représentée sur une échelle préfigurative. On peut remarquer, cependant, que ce schéma ne prévoit pas une augmentation continuelle. Quelques uns des facteurs qui contribuent à cette éventuelle stagnation dans les années 90 n'ont pas une origine d'ordre technique, mais relèvent :

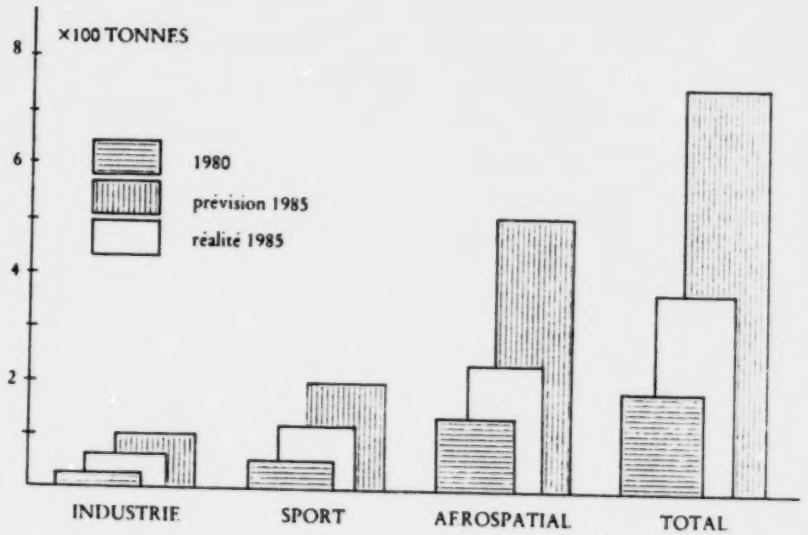


Figure 1 : Consommation des fibres de carbone

- de l'éducation,
- de la conception des éléments en composites qui exige des connaissances appronfondies et l'on doit former les concepteurs et les habituer à "penser composites,"
- du coût des matériaux. Le coût, comme le démontre le graphique 4, des nappes et des tissus préimprégnés dépasse de beaucoup le prix des feuilles de métal. L'utilisation des composites dans le domaine technique en général est très fortement liée au coût. Dans l'industrie aéronautique, une plus grande importance est accordée à la notion de réduction de poids.
- des propriétés des métaux. La durabilité, la rupture fragile, l'élongation à la rupture faible, les propriétés interlaminaires et la qualité d'adhésion de la fibre à la résine sont des facteurs qui exigent encore actuellement une recherche approfondie.
- des aspects technologiques. L'utilisation de prepregs obtenus à partir de résine thermodurcissables exige généralement un équipement complexe d'autoclave. A l'inverse, ces prepregs sont facilement manipulés. Un cycle type

d'autoclave demande plusieurs heures. De nos jours, de nombreux travaux sont menés dans le développement du moulage transfert des résines. Des résultats excellents ont déjà été obtenus. La technologie de l'injection de la résine a sûrement un avenir prometteur. Un autre récent procédé intéressant allie une mise en œuvre rapide aux qualités excellentes des matériaux.

Les thermoplastiques

A l'inverse des thermodurcissables, les thermoplastiques n'ont pas de cycle de durcissement. Le matériau est chauffé, mis en forme et refroidi. Les thermodurcissables sont très bien connus des nombreux mouleurs de pièces injectées. Ces dernières années, les thermoplastiques se sont développés pour faire face aux exigences des composites. Un module de Young élevé, une importante élongation à la rupture et une bonne résistance à l'environnement sont des paramètres offerts pour des applications en développement . Le tableau 1 cite les caractéristiques d'un certain nombre de thermoplastiques et les compare avec celles de la résine époxy thermodurcissable. A la lecture du tableau, on peut remarquer que le PEEK est avantageux à de nombreux points de vue. Cependant, sa structure cristalline rend difficile sa mise en œuvre. Un autre thermoplastique qui présente également de bonnes propriétés est le PEI (polyetherimide). Bien que, pour certaines applications, le PES et le PC ne doivent pas être négligés. Cette conférence met l'accent sur le PEI.

Fabrication des stratifiés plats

Un stratifié thermoplastique doit se faire à partir de tissu préimprégné. La quantité de résine nécessaire est précisément donnée lors de l'imprégnation et correspond au minimum nécessaire pour éviter les porosités. Une addition de film thermoplastique n'est pas nécessaire mais peut être effectuée afin d'obtenir un excellent aspect de surface.

Avant d'être pressé, le tissu préimprégné doit être déshydraté. Le polyétherimide (PEI7 est hygroscopique ; s'il reste de l'humidité, des bulles se forment dans le stratifié. Pour obtenir des stratifiés homogènes, il faut respecter certaines combinaisons de pression, durée et température, par exemple : 5 minutes, 230°C, 15 bar.

COMPOSITES A FIBRES

Matériaux composites : Fokker 100

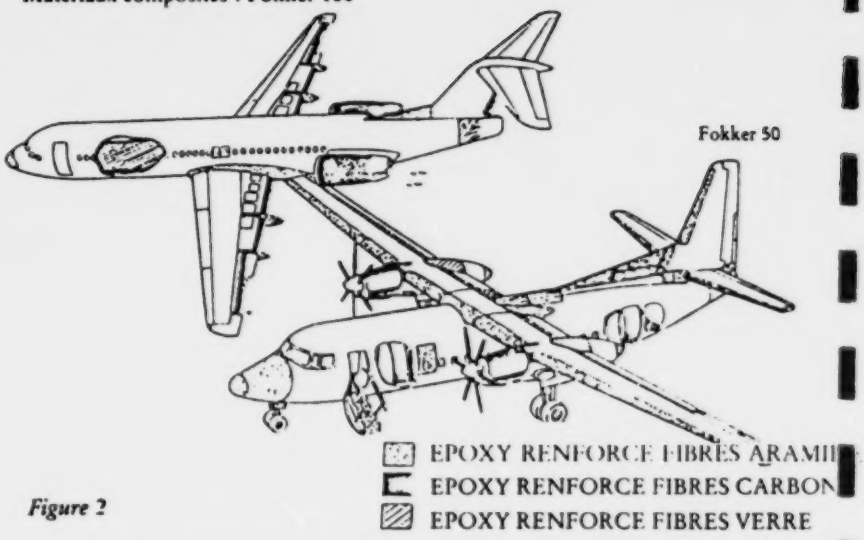


Figure 2

Airbus Industrie
Introduction des composites en aéronautique

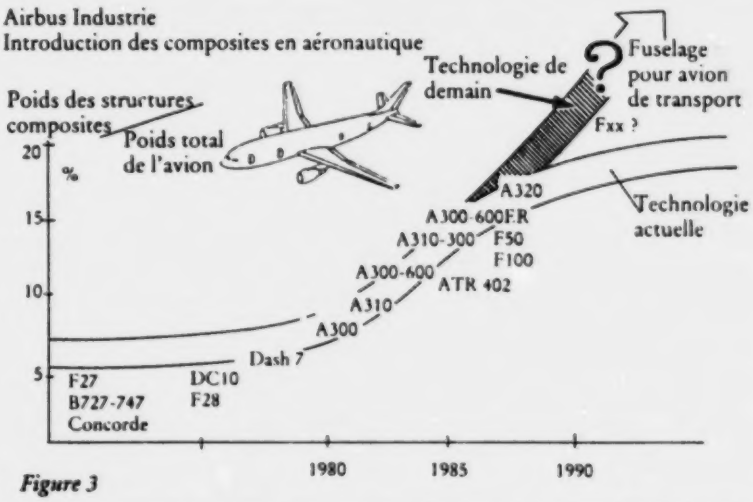


Figure 3

Tableau 1

	Epoxy	PA6	PEEK	PEI	PES	PC
Résistance traction (MPa)	50	60	100	105	84	60
Module flexion (GPa)	4.1	1.55	3.8	2.6	2.5	
Résistance choc (SIm)	50	175	85	70	84	700
Elongation rupture (%)	1.4	20	—	7	—	8
Température fléchissement (°C)	200	190	300	219	203	150
Poids spécifique (g/cm³)	1.3	1.14	1.32	1.27	1.37	1.24

PC - polycarbonate
PES - polyethersulphone
PEI - polyetherimide
PEEK - polyetherethecetone
PA6 - nylon 6.6

Le moulage des pièces curvilignes

Le procédé de moulage des stratifiés renforcés de fibres continues présente de nombreuses similitudes avec celui du formage des feuilles métalliques. La figure 5 montre le procédé généralement utilisé. Le matériau est chauffé à 320 °C et ensuite pressé dans un moule; Le temps du transfert entre le lieu de chauffage et celui du moulage doit être réduit au minimum. Pour une fabrication expérimentale ou d'un prototype, on peut utiliser de simples outils. Un moule en bois suffit même pour une fabrication "pilote" quand une structure à surface lisse n'est pas exigée. La figure 6 montre un exemple de moule en contre plaqué.

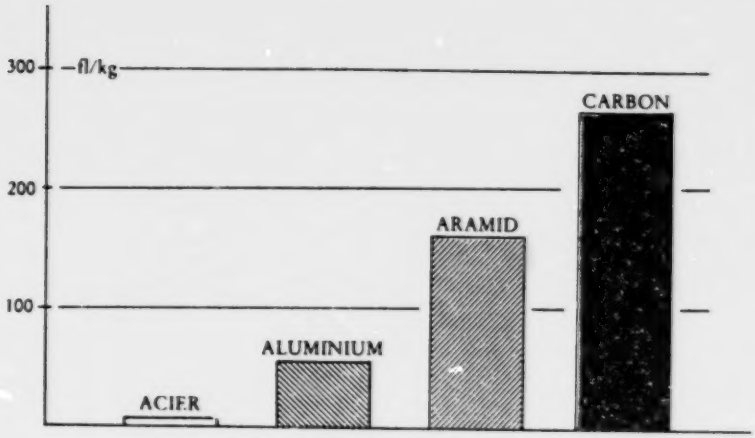


Figure 4 : Prix des matériaux

Tissus

Il est évident que ce ne sont pas tous les tissus qui peuvent se déformer facilement lors du moulage. Néanmoins, un large éventail de tissus donne de bons résultats; nous en retiendrons principalement les sergés (figure 7) ou mieux les satins pour les pièces curvilignes. la figure 8 montre l'exemple d'une pièce réalisée à partir du moulage d'un laminat plat thermoplastique PET présentant des doubles courbures importantes.

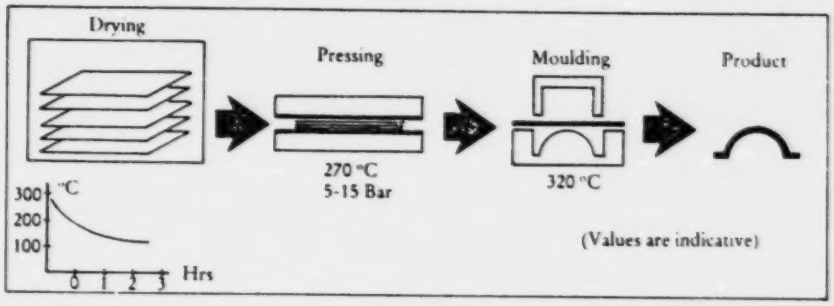


Figure 5

Autres aspects techniques de transformation

La chaleur est l'outil de base du formage et de nombreux moyens conventionnels peuvent être utilisés pour réaliser des strafifiés thermoplastiques renforcés de fibres continues. N'importe quelle source est valable :

- air chaud
- chaleur par induction
- infrarouge
- plaques ou rouleaux chauffés

Concernant les techniques d'assemblage, les thermodurcissables sont avantageux sur plusieurs points. Les thermodurcissables sont assemblés à l'aide d'adhésifs qui doivent être réticulés, opération qui prend du temps par contre, les thermoplastiques peuvent être assemblés par soudure simplement en "fondant" localement. Le soudage par ultrasons en utilisant un équipement conventionnel donne de très bonnes possibilités d'assemblage d'éléments thermoplastiques renforcés de fibres. Les prepregs obtenus à partir de thermoplastiques sont propres et faciles à manipuler. Aucune précaution de stockage n'est nécessaire. Contrairement aux thermodurcissables, il ne se produit pas de réaction chimique

Figure 6

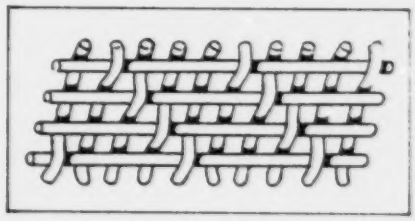


Figure 7

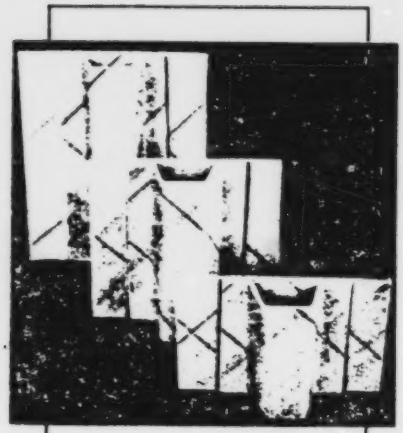
durant un stockage prolongé ou durant la mise en œuvre; la pollution de l'air est réduite au minimum.

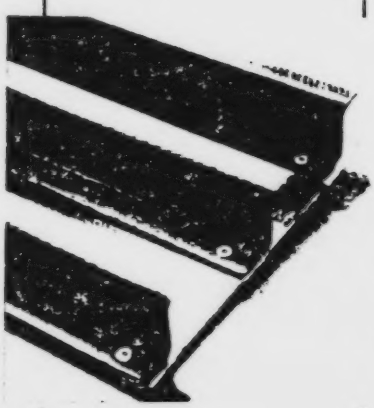
Les thermoplastiques peuvent être recyclés jusqu'à un certain point puisqu'il suffit de chauffer pour modifier les formes. Après broyage, les chutes peuvent être destinées à l'injection.

Caractéristiques des composites à base de polyetherimide renforcé de tissu de verre

Un programme expérimental a été entrepris en coopération entre TEN CATE et MBB pour caractériser les laminats de polyetherimide renforcés de fibres de verre. Ce programme comprend la détermination et la résistance à la rupture et à la flexion à − 55°C, à température ambiante et à + 80°C. Dans le graphique n° 2 est représentée la résistance de PEI comparée aux systèmes epoxy et phénolique. A température ambiante, les valeurs sont comparables, à + 80°C, la dégradation est de l'ordre de 10 %, à − 55°C, la résistance augmente considérablement.

L'exposition à différents "environnements" a fait partie de l'étude. La durée d'exposition a été de 30 jours. Sur le graphique n°2, nous voyons les valeurs de résistance à la flexion à + 80°C, à température ambiante et à − 55°C après un séjour effectué dans l'eau, du JP4 (Jet engine fuel) et du Skydrol 500 B (fluide hydraulique). Nous notons principalement une altération légère de la résistance au Skydrol à basse température et température ambiante.





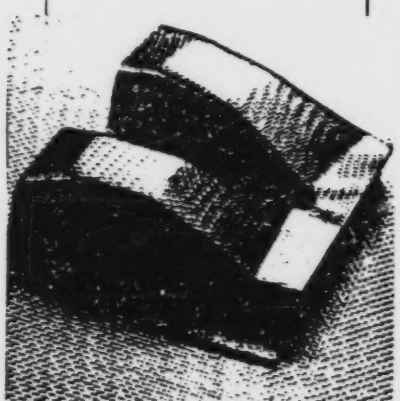
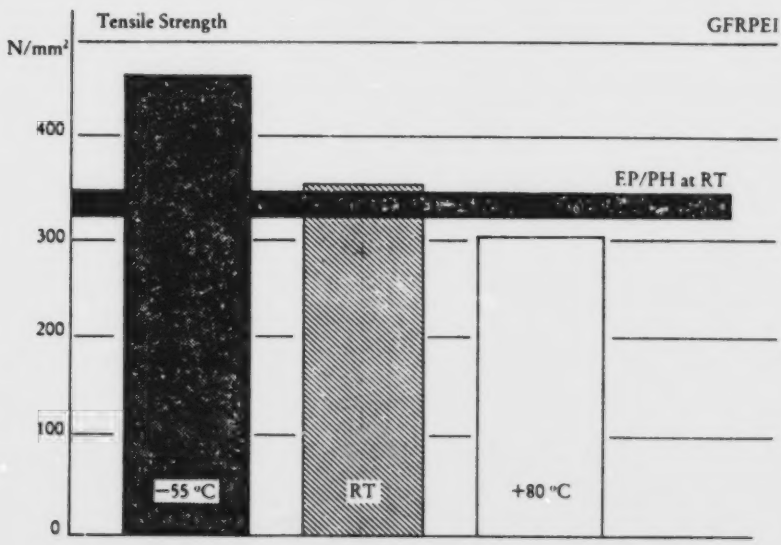
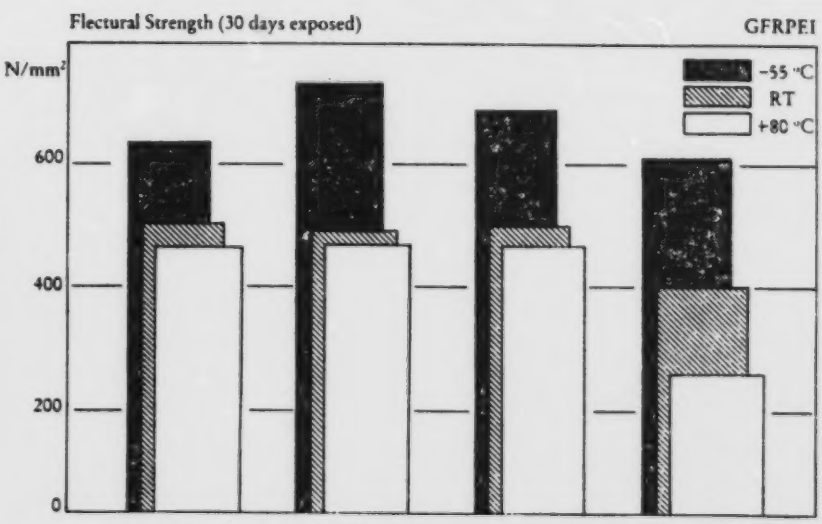


Figure 8



Graphique 1



Graphique 2

Le graphique n°3 montre les résultats comparés de la résistance à la compression et nous notons des valeurs similaires aux epoxy et phénolique, mais améliorées.

Le graphique n°4 indique le module de flexion et nous voyons que les valeurs obtenues indiquent que le PEI est performant lorsqu'il ne nécessite pas une exposition prolongée au Skydrol.

Certaines exigences pour les matériaux utilisés à l'intérieur des avions, telles que la toxicité et l'émission de fumée, sont particulièrement importantes. Sur ces aspects, l'auto-extinguibilité et le "no dropping" du PEI sont très favorables.

Le graphique n°5 compare la vitesse de combustion entre trois matériaux utilisés dans les intérieurs d'avions et montre le comportement supérieur du PEI.

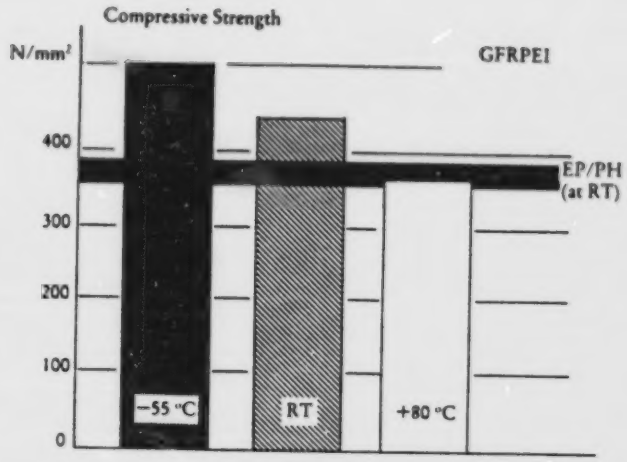
Conclusion

Les résultats de ces premiers tests présentés ci-dessus sont prometteurs. Le polyetherimide a des performances mécaniques satisfaisantes également lorsqu'il est exposé à un milieu hostile.

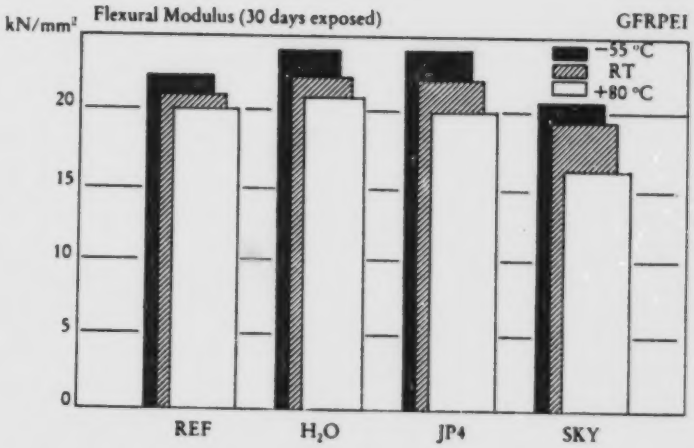
Pour avoir une vision complète des caractéristiques du polyetherimide renforcé de tissu de verre, notre programme de coopération avec MBB comprend l'étude du comportement avec les solvants et divers agents de nettoyage. En se basant sur les premiers résultats de laboratoire, le GFRPEI (glass fabrics renforced of PEI) est particulièrement indiqué pour l'aménagement intérieur d'avions.

En coopération avec Euro-Composites et Du Pont de Nemours, l'industrialisation de panneaux Nomex avec peau thermoplastique est actuellement en développement. Ce procédé ne nécessite pas l'utilisation d'adhésifs. Aussi, pour le moment, les efforts sont concentrés sur les renforts de verre et d'aramide qui sont les matières essentiellement utilisées à l'intérieur des avions.

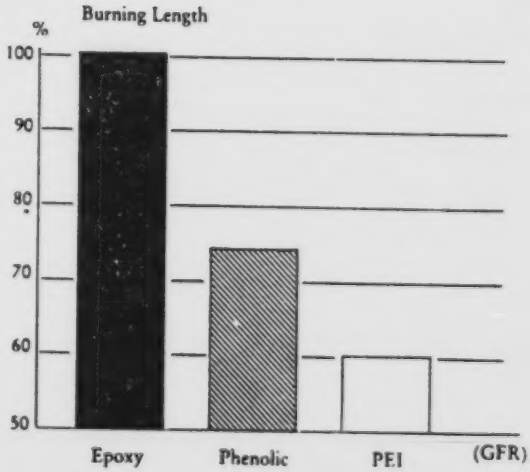
L. POST
W.H.N.R. DRUMMEL



Graphique 3



Graphique 4



Graphique 5

FIBERGLAS CANADA INC

PRF

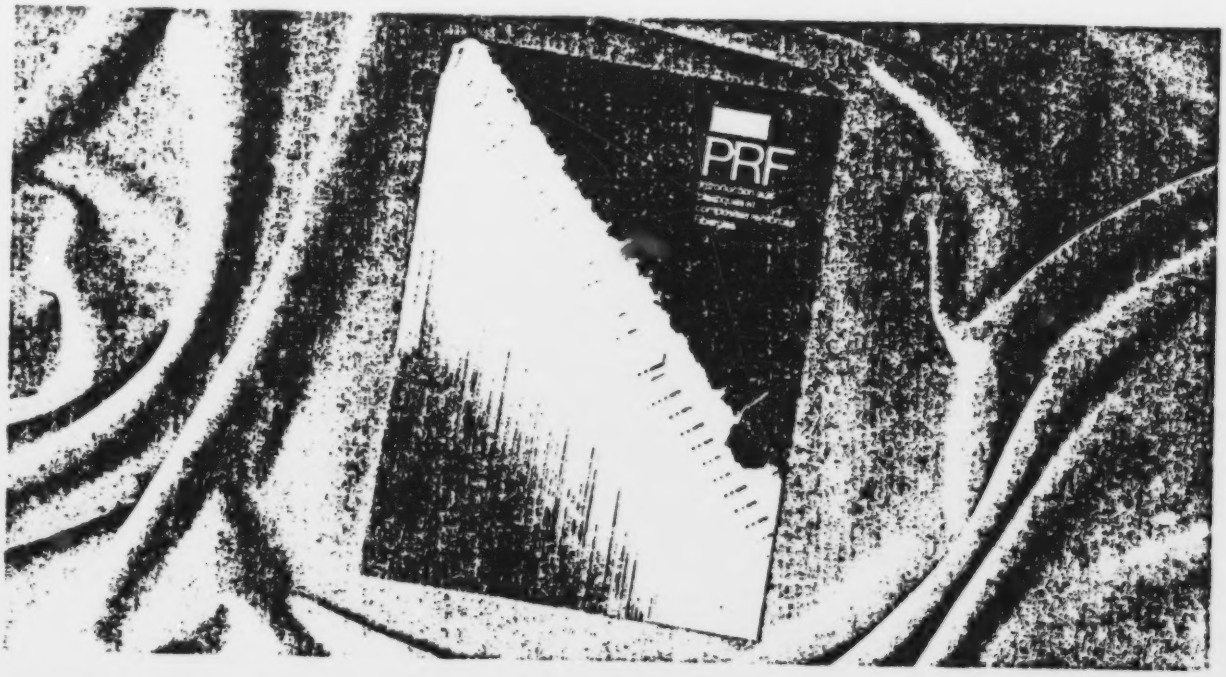
Introduction aux plastiques et composites renforcés Fiberglas

Table des matières

Section I **Renseignements généraux**	4
Qu'est-ce que le plastique renforcé Fiberglas*?	5
Large gamme de procédés de fabrication	6
Les avantages fondamentaux des PRF	7
De nombreux marchés, de nombreuses utilisations	8
Section II **Guide des matériaux**	9
Quatre principes qui déterminent le choix du matériau	10,11
Spécifications des renforts Fiberglas	12-14
Le choix des résines	15
Résines polyesters	16,17
Époxydes et autres résines thermodurcissables	18
Résines thermoplastiques	18
Composé de moulage en feuille	19
Composé de moulage en vrac	20
Préformes	21
Composés thermoplastiques renforcés	22
Section III **Méthodes de moulage**	23
Méthodes de moulage au contact: *application à la main, pulvérisation*	24, 25
Moulage par injection et compression	26, 27
Méthodes de moulage à froid	28, 29
Autres méthodes de moulage	30-33
Section IV **Guides de dessin**	34
Guides de dessin: *introduction, étapes initiales*	35, 36
Le choix des matériaux, procédés et production	37, 38
Propriétés physiques et chimiques des PRF	39-43
Guides de dessin pour les procédés de moulage	44
Le mouleur à façon et l'assistance qu'il peut apporter	46

Fiberglas* est une marque déposée de Fiberglas Canada Inc

Ce manuel présente tous les renseignements nécessaires... rapidement et de façon claire.



Il est divisé en quatre sections.

I. Renseignements généraux
Cette section explique en termes très simples, de quoi sont faits les plastiques renforcés Fiberglas, les propriétés qu'ils offrent, les méthodes de production disponibles, les produits qui utilisent avantageusement les PRF, et ce que sont ces avantages – pour le dessinateur, le mouleur et le client. Cette section est destinée à l'individu qui découvre les PRF pour la première fois. Elle sert également à guider le lecteur plus informé plus avant dans cette brochure où certains renseignements sont traités de façon plus détaillée.

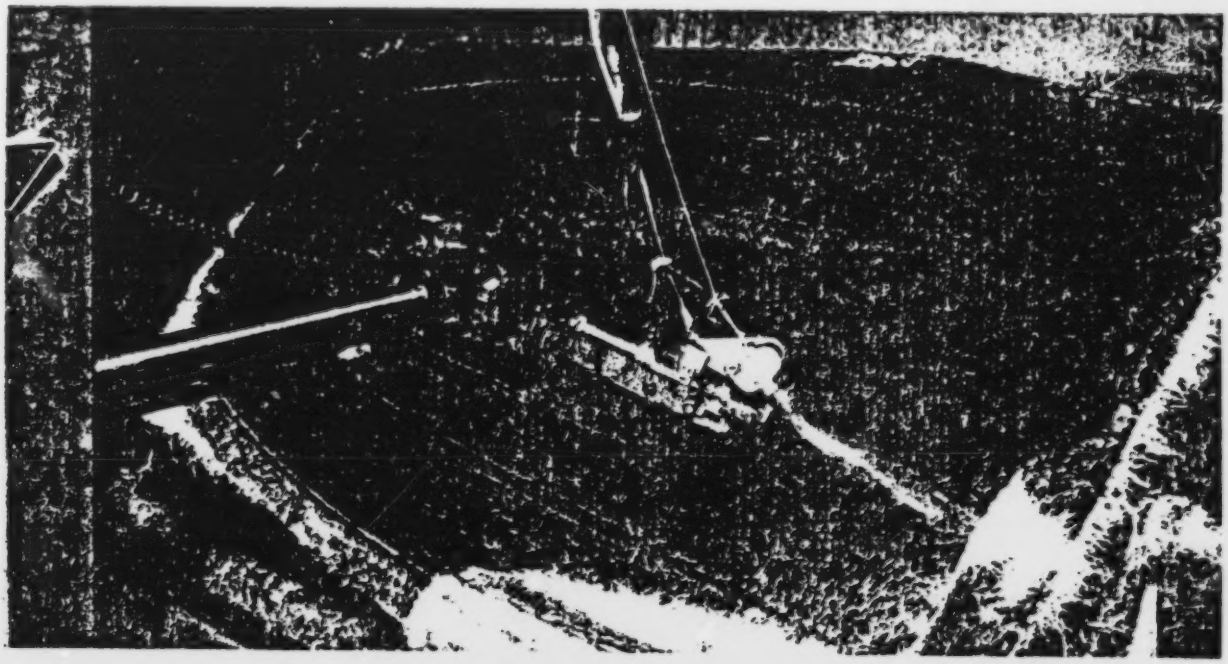
II. Guide des matériaux.
Cette section fournit des renseignements détaillés concernant les différents types de verre fibreux disponibles, et la façon dont le contenu de verre et l'arrangement affectent le produit fini; les divers systèmes de résines utilisés à l'heure actuelle (tant thermodurcissables que thermoplastiques), et les autres additifs que l'on recontre habituellement dans les PRF pour obtenir le meilleur procédé ou produit, et les composés préparés de verre et de résine prêts à mouler. Dans cette section, le lecteur peut être en mesure de choisir un ou deux composites conformes à son application, ce qui lui permet d'aborder de manière plus sélective les sections suivantes.

III. Méthodes de moulage.
Cette section décrit en détail toutes les méthodes de moulage éprouvées – technique, type de produit, volume, type de moule et autres paramètres qui aideront le dessinateur ou l'utilisateur éventuel à choisir un procédé convenant à son application.

IV. Guides de dessin.
Pour finir, le manuel donne la procédure complète, étape par étape, pour passer du stade des idées à la production des PRF en grande quantité. La conception initiale, l'établissement des exigences économiques et du rendement, le choix du procédé, le choix des matériaux, prototypes, outillages et concepts de production en quantité, sont traités dans cet ordre. Les propriétés mécaniques, chimiques et électriques complètes de la plupart des composites PRF comparées à celles d'autres matériaux figurent au tableau dépliant à la fin du manuel.

Publications techniques sur les PRF.
Nombre des sujets brièvement traités dans cette brochure sont discutés en détail dans d'autres publications sur les plastiques renforcés Fiberglas. Pour obtenir des copies de ces publications, il suffit d'écrire à:
Fiberglas Canada Inc.
Division des textiles, renforts et produits chimiques
3080 Yonge Street
Toronto (Ontario)
M4N 3N1

Les plastiques renforcés Fiberglas: Une famille de matériaux techniques de base



PRF –
Plastiques renforcés Fiberglas
C'est une coque de bateau de 26 m (85'), ou un réservoir contenant environ un million de litres d'acide chlorhydrique.

C'est l'avant d'une voiture et l'armature d'un climatiseur. C'est une canne à pêche, un radome d'avion, et un isolateur haute tension. Un ensemble baignoire/douche, une chaise et plus de 35,000 autres produits de tout genre.

Les PRF forment maintenant une famille de matériaux techniques de base. Avec une technologie éprouvée pour étayer les nouveaux développements, et une gamme de méthodes de production à leur disposition, les ingénieurs-dessinateurs de tous les domaines de l'industrie se tournent vers les PRF.

Ils offrent des combinaisons de propriétés que l'on ne trouve dans aucun autre matériau: grande force et stabilité dimensionnelle avec un faible poids, résistance à la corrosion et excellentes propriétés diélectriques, possibilités de consolidation des pièces et souplesse à la conception, coût modique de finition et coût d'usinage modéré.

Le coût relativement stable des PRF par rapport aux augmentations des coûts pour les matériaux métalliques, vient encore s'ajouter à tous ces avantages. Et de nombreux dispositifs automatisés sont maintenant disponibles pour sortir les pièces à des taux de production élevés et de faibles coûts de main-d'oeuvre. Cela explique clairement la confiance grandissante dans les plastiques renforcés Fiberglas, et leur marché en plein essor.

Pourquoi avons-nous préparé ce manuel?
Le but de ce nouveau manuel sur les plastiques/composites renforcés Fiberglas est de fournir un ouvrage de référence à jour sur l'état actuel de la technologie des PRF. Il présente une connaissance de base des matériaux et des bénéfices qu'ils peuvent apporter, ainsi que les méthodes utilisées aujourd'hui et les principes de dessin industriel avec les plastiques renforcés Fiberglas.

L'automatisation des procédés PRF – comme cette opération de pulvérisation à commande automatisée – réduit les coûts de main-d'oeuvre, élimine de nombreuses variables de procédés et accroît la production.

Section I

Qu'est-ce que les PRF?

Renforts et plastiques Fiberglas... combinés pour former une famille de matériaux techniques

On ajoute le renfort Fiberglas à une matrice de plastique pour produire une famille de matériaux techniques présentant une large gamme d'avantages de coût/rendement.

Les fibres de verre de renfort offrent au composite force, stabilité dimensionnelle et résistance à la chaleur. D'autres propriétés – chimiques, électriques, coloris et fini, par exemple, sont déterminées par le choix du matériau plastique à renforcer (système de résines).

Gros volume – Ces grosses presses alimentent les chaînes de production automobiles en éléments extérieurs de voitures moulés par compression prêts pour peinture et assemblage.

Le verre de renfort

Le verre fibreux se présente sous de nombreuses formes, en fonction des diverses méthodes de production disponibles. Ces formes sont: fils coupés, stratifils, mats et tissus. Tous les produits de renfort Fiberglas sont traités pour garantir la compatibilité du procédé avec les types spécifiés de systèmes de résines.

Le système de résines

Il existe de nombreux types de plastiques qui fournissent une gamme étendue de propriétés mécaniques, chimiques, thermiques et esthétiques, en combinaison avec le type approprié de renfort Fiberglas. Il y a deux catégories fondamentales de systèmes de résines:

1. **Thermodurcissables.** On utilise généralement la chaleur pour façonner et durcir la pièce de façon permanente. Le plastique, une fois pris, ne peut pas être reformé; le procédé est irréversible.
2. **Thermoplastiques.** On utilise la chaleur pour fondre ou ramollir le plastique pendant l'opération de façonnage. La forme est retenue après refroidissement de la pièce. La forme n'est pas permanente, étant donné que la chaleur ramollit le plastique et lui permet de couler. Le procédé est réversible.

Autres éléments des composites

En fonction de l'application et du procédé de fabrication choisi, on emploie un certain nombre d'autres additifs pour donner des propriétés spécifiques au produit ou au procédé. Ceux-ci comprennent les pigments (pour incorporer la couleur au moulage), les composés retardant les flammes, les charges inertes, les composés pour rehausser le fini de surface et réduire le rétrécissement dans le moule, les agents de moulage, les catalyseurs (pour la prise), les matériaux de contrôle de viscosité et les additifs de résistance aux intempéries.

Le choix de mélange de Fiberglas et de résine

Un choix essentiel pour l'ingénieur-dessinateur qui travaille avec les PRF: la meilleure combinaison de verre fibreux et de résine. Des milliers de choix sont possibles et on peut contrôler la composition pour satisfaire virtuellement n'importe quelle combinaison désirée d'objectifs de rendement et de coût.

Le choix de la composition dépend généralement des propriétés requises du produit fini: mécaniques et chimiques. La composition choisie, les considérations générales de forme et le volume de production indiquent, à leur tour, le procédé de fabrication à employer.

Le dessinateur arrivera à la bonne décision grâce à l'examen, étape par étape, de la technologie des plastiques renforcés Fiberglas que nous présentons ici, en faisant tout d'abord un choix provisoire des matériaux, décidant ensuite du meilleur procédé, et finalement déterminant le procédé exact et la configuration finale du produit.

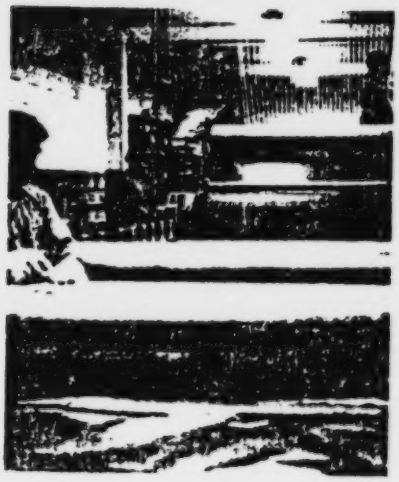
Choix du procédé optimum

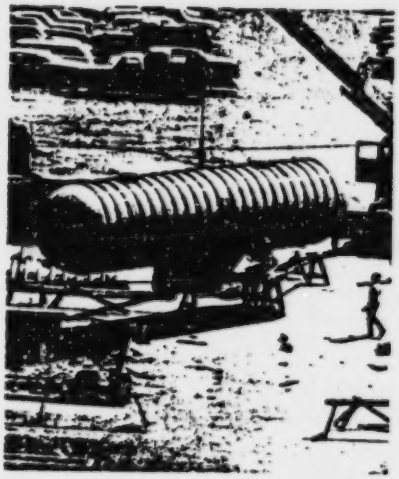
La technologie des plastiques renforcés Fiberglas engiobe une large gamme de procédés de fabrication. Ces derniers offrent une diversité illimitée, que le produit fini soit un bateau de 20 m (70'), ou un tout petit engrenage de précision.

Quels que soient les dimensions de la pièce, sa complexité, le volume de production ou les propriétés requises, il existe un procédé de production présentant un coefficient coût/rendement favorable.

Méthode de moulage au contact pour grosses pièces en PRF

En général, le moulage au contact se fait avec un moule ouvert: soit une configuration "mâle" qui contrôle la forme interne et le fini de la pièce, soit une configuration "femelle" qui contrôle la forme externe et le fini. Un laminé de renfort Fiberglas et de résine est obtenu à la main ou avec un pistolet de pulvérisation qui dirige les fibres courtes et la résine catalysée sur la surface du moule. La pièce est en général prise à la température ambiante. En raison des catalyseurs et additifs chimiques, la prise se fait sans ajouter de pression. La pression n'est appliquée que pour combiner le verre et la résine.





Ces procédés de moulage par contact peuvent se modifier pour améliorer la surface de la pièce une fois sortie du moule, pour densifier le laminé et pour contrôler l'épaisseur, ou pour accélérer la prise de la pièce.

Les procédés de moulage par contact conviennent parfaitement à la fabrication de grosses pièces comme les coques de bateaux. On peut obtenir d'excellentes propriétés mécaniques à un coût d'usinage modéré.

Les procédés de moulage par contact et les modifications sont décrits en détail aux pages 24 et 25.

Moulage par compression et par injection de pièces complexes à gros volume

Les techniques à gros volume, notamment le moulage par compression (généralement avec résines thermodurcissables), et le moulage par injection (généralement thermoplastiques) sont maintenant beaucoup utilisées dans la fabrication de composés PRF très raffinés, à des taux de production très rapides. De telles pièces se caractérisent par un fini supérieur, un excellent contrôle dimensionnel et un niveau élevé de complexité.

Les moulages par compression et par injection offrent une diversité considérable en ce qui concerne les façons dont le renfort Fiberglas, le système de résines et les additifs peuvent s'adapter aux conditions requises par l'utilisation finale et être introduits dans les moules. Dans le moulage par compression, les fils coupés et la résine précombinés sont disponibles en feuilles (composé de moulage en feuille), ou en vrac (composé de moulage en vrac). Ces composés sont placés dans le moule et façonnés en pièces thermodurcies par l'application de chaleur et de pression.

Pour des feuilles plates et des formes simples, on place des mats de verre dans le moule, on verse la résine sur le mat, puis on ferme le moule sous pression pour combiner résine et verre. La chaleur sert à faire prendre la résine.

Pour des pièces plus complexes, on peut placer dans le moule des formes préformées de verre fibreux et de résine (que l'on appelle "préformes"). On peut incorporer des fils coupés à des poudres ou granules de moulage de résine thermoplastique pour moulage par injection.

Dans les procédés de moulage par compression et injection, les pressions et températures généralement employées nécessitent de grosses presses et des moules en acier. Toutefois, étant donné que beaucoup de pièces complexes peuvent être moulées à des taux de production élevés, le coût d'usinage par pièce peut souvent être très bas, tout comme peut l'être le facteur de main-d'oeuvre directe, ce qui permet un coefficient coût/rendement avantageux.

Ces procédés de base et leurs variations sont discutés en détail aux pages 26 et 27.

Méthodes de moulage à froid

Les méthodes de moulage à froid comme le moulage sous pression à froid et le comoformage représentent de récents progrès de la technologie offrant des avantages de production pour les pièces à volume moyen ayant d'excellentes propriétés esthétiques, de résistance aux intempéries et de fini. Ces méthodes se situent entre les techniques de moulage par contact (où l'usinage est simple et peu dispendieux), et les méthodes plus automatisées (où les coûts d'usinage sont élevés).

Les méthodes de moulage à froid sont décrites en détail aux pages 28 et 29.

Autres méthodes de fabrication importantes

Il existe d'autres procédés disponibles pour des applications nécessitant des formes spéciales, une orientation du renfort, et des systèmes de résines. Parmi ceux-ci, mentionnons: *le bobinage filamentaire*, méthode qui produit une concentration de fibre de verre relativement élevée et une orientation précise pour la mise au point de structures creuses, comme tuyaux, réservoirs et autoclaves; *la pultrusion*, utilisée pour produire des longueurs de produits PRF très résistants à profil régulier, comme par exemple les profilés; et *le moulage par rotation*, qui combine des fils coupés Fiberglas à des poudres de moulage sélectionnées pour produire des formes creuses, grandes et complexes, comme les globes lumineux.

Ces méthodes spéciales de moulage sont décrites avec d'autres aux pages 30 à 33.

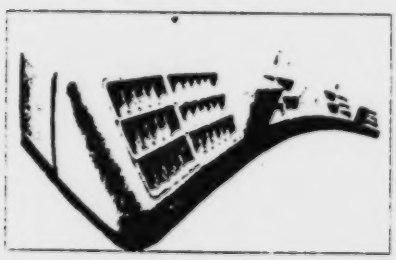
Les avantages fondamentaux des plastiques renforcés Fiberglas

L'évolution de la technique des plastiques renforcés Fiberglas, et le haut degré de confiance que les PRF ont remporté auprès des ingénieurs-dessinateurs portent leurs fruits parce que les utilisateurs se rendent compte que les PRF offrent d'excellents avantages de coût/rendement pour le fabricant comme pour le consommateur. On obtient le coefficient coût/rendement optimum lorsque l'ingénieur-dessinateur prend en considération les caractéristiques fondamentales suivantes des PRF dès la conception d'une nouvelle utilisation:

Forte résistance.
Les plastiques renforcés Fiberglas peuvent être conçus pour donner une large gamme de propriétés de résistance à la traction, à la flexion et aux chocs.

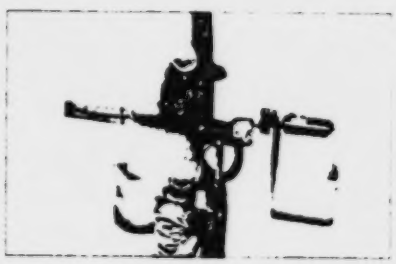
Légèreté.
Les plastiques renforcés Fiberglas offrent une résistance par unité de poids plus grande que n'importe quel plastique non renforcé, et que la plupart des métaux.

Souplesse de conception.
Les plastiques renforcés Fiberglas peuvent prendre n'importe quelle forme désirée – simple ou complexe, grande ou petite.



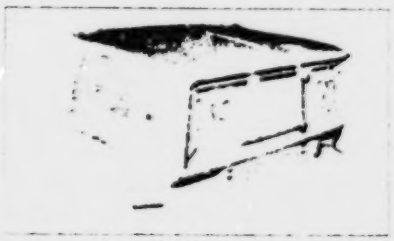
Stabilité dimensionnelle.
Les pièces en plastiques renforcés Fiberglas gardent leur forme sous de sévères contraintes mécaniques et d'environnement.

Grande résistance diélectrique.
Les remarquables propriétés électriques des plastiques renforcés Fiberglas en font le choix évident pour l'isolation d'éléments porteurs de courant.



Résistance à la corrosion.
Les plastiques renforcés Fiberglas ne rouillent pas et ne se corrodent pas. Il existe un grand choix de systèmes de résines (en fonction des exigences particulières de l'application) qui offrent une résistance à presque tous les environnements chimiques.

Consolidation de pièces.
Une seule structure de plastique renforcé Fiberglas peut remplacer un assemblage de nombreuses pièces et attaches. Le temps de montage est ainsi réduit.



Finition simplifiée.
La peinture peut souvent être éliminée. Le coloris peut être moulé dans le laminé pour donner une belle apparence durable.

Coût d'outillage modéré.
Quelle que soit la méthode de traitement choisie, l'outillage pour les plastiques renforcés Fiberglas représente généralement une très faible part du coût unitaire de production.

Tous ces avantages fondamentaux réunis présentent d'importants bénéfices de coût/rendement pour le fabricant ... et de meilleurs produits pour l'utilisateur.

De nombreux marchés...de nombreuses utilisations pour les plastiques renforcés Fiberglas

Voici quelques-uns des domaines où les plastiques et composites renforcés Fiberglas ont fait de grands progrès. Nous donnons la liste de quelques-unes des utilisations finales les plus remarquables ... mais ce n'est que le début de la grande diversité des PRF.

Automobile

Où les pièces à gros volume, à finition soignée, atteignent tout leur potentiel – et réduisent les coûts.

Éléments de carrosserie, élargisseurs de passage de roues, avants, boîtiers de phares et de feux arrière, capots, becquets aérodynamiques, tableaux de bord, consoles de levier de vitesses, éléments de moteur, capots de camions, ailes, éléments de cabine et de carrosserie, réservoirs isolés, couvre-moteur, carters et doublures d'ailes.

Agriculture

La solidité et la résistance à la corrosion sont des propriétés très désirables. Capots de tracteurs, calandres, boîtiers d'instruments, sièges, ailes, carrosseries et carters de tracteurs de jardin et tondeuses à gazon, réservoirs et pulvérisateurs d'engrais et d'insecticides et auges.

Appareillage

Des pièces moulées complexes remplacent les pièces coulées et les assemblages de tôle avec attaches et soudures nombreuses. Encadrements de climatiseurs de pièces, plateaux d'évaporation, condenseurs et ventilateurs de compresseurs, encadrements d'humidificateurs et pales de souffleries, corps de pompes, conduits de sécheuses, cuves à lessive, réservoirs d'adoucisseurs d'eau, commandes et tuyauterie, boîtiers de ventilateurs, engrenages, boîtiers d'aspirateurs, poignées de fers à repasser, distributeurs de savon, plateaux de cuisson des fours à micro-ondes, tables pivotantes de télévision et bases de pompes d'assèchement.

Aviation/aérospatiale

La résistance et la légèreté sont les caractéristiques-clés des PRF. Éléments intérieurs d'avions de passagers et cargo, ailerons, éléments d'antennes, radomes, réservoirs d'ailes, conduits, carters de moteurs de fusées, buses, réservoirs sous pression, boîtiers d'instruments et tubes de lancement.

Machines de bureau

Les PRF assurent excellente finition et stabilité dimensionnelle à des températures élevées, avec grande résistance pour boîtiers et panneaux. Couvercles et boîtiers de machines, panneaux d'accès, claviers, touches, têtes d'impression, panneaux de montage, encadrements, engrenages, cames et leviers, circuits imprimés et ventilateurs.

Traitement chimique

La résistance à la corrosion est la clé d'utilisations très étendues des PRF. Réservoirs chimiques, tuyaux et canalisations, réservoirs d'emmagasinage et trémies, corps de valves et de pompes, enveloppes, turbines, autoclaves, filtres, hottes aspirantes et canalisations, épurateurs, grilles galvanoplastiques et équipement de manutention et équipement de développement photographique.

Construction

Solidité et coût modéré allié à un bel aspect. Profilés, panneaux, parements, verrières, éléments de mur-rideau, panneaux de vitrage, couvertures de patios et coffrages à béton.

Électricité/électronique

Forte résistance diélectrique et faible absorption d'humidité. Éléments de lignes de transmission, traverses, isolateurs de tension, supports, globes d'éclairage incassables, manettes d'interrupteurs, tiges sous tension, éléments électroniques, boîtiers et planches de fixation et équipement d'entretien des lignes de services publics.

Habitation

Les PRF apportent beauté, minimum d'entretien et de coût. Éléments d'architecture, appareils et équipement, mobilier, chaises, tables, mobilier de jardin, éviers, baignoires, douches et verrières.

Marine

Les PRF offrent réparations faciles, entretien réduit et haut rendement. Coques et superstructures de bateaux de plaisance, commerciaux et militaires, écoutilles de péniches, verrières, réservoirs de carburant, réservoirs d'eau, mâts et perches, cloisons, conduits, manches d'aération, bouées de repérage, docks flottants et housses de moteurs hors-bord.

Manutention de matériaux

La forte résistance et la légèreté des PRF produisent des pièces solides et de longue durée. Plateaux et bacs de transport, plateaux de traitement et de livraison des aliments, boîtes, bacs, réservoirs et tuyaux, éléments de convoyeurs, palettes, patins et équipement de manutention de cargo.

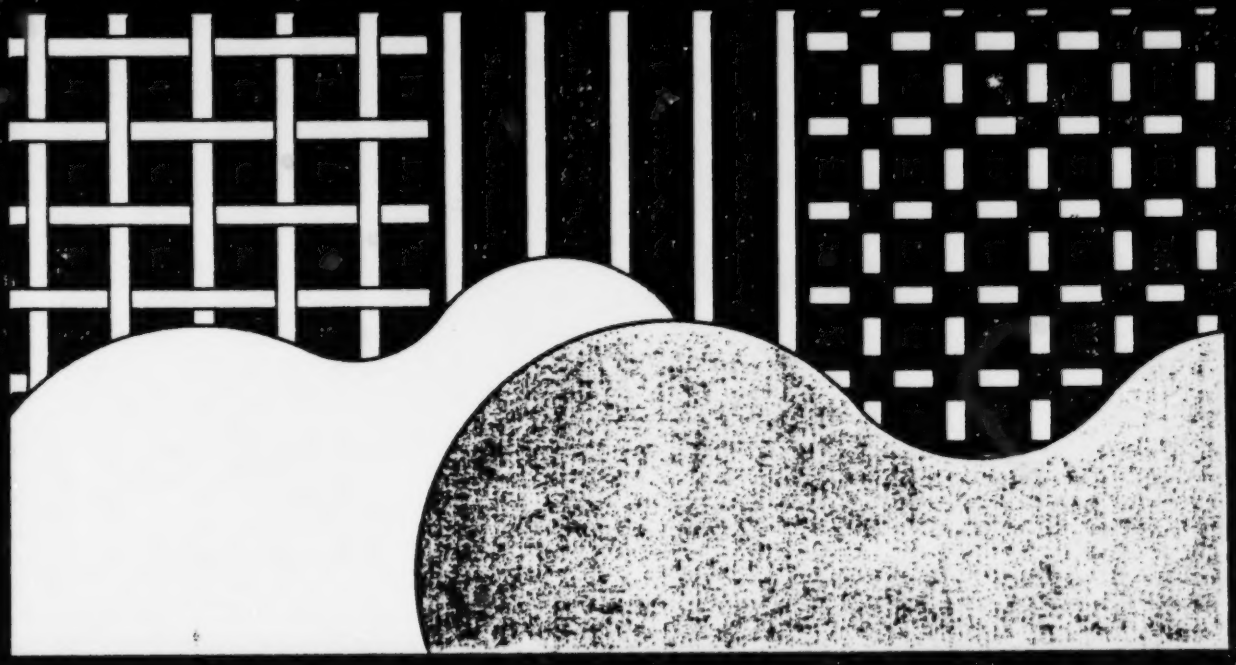
Récréation

Le faible entretien et le bel aspect produisent de meilleurs articles et équipements de sport. Maisons mobiles, remorques, remorques de camping, couvertures de pick-up, skis nautiques et de neige, planches de surfing, bâtons de golf, bâtons de hockey, bâtons de lacrosse, arcs de tir, cannes à pêche, perches de saut, bateaux de plaisance, conoes, carrosseries de motoneiges et de véhicules tout-terrain, chariots de golf, casques protecteurs, piscines, plongeoirs et équipement de terrains de jeux.

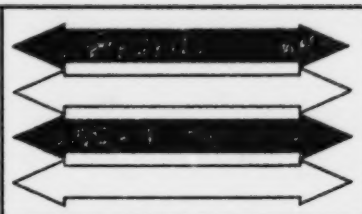
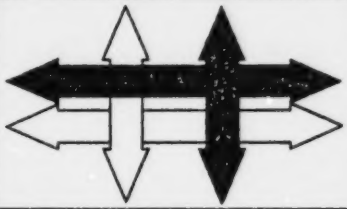
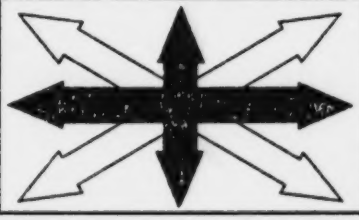
Transports

La solidité et la légèreté des PRF augmentent la capacité de chargement et la durée de l'équipement. Éléments de wagons de chemins de fer pour passagers et fret, sièges de transport, toits de wagons, capots de wagons à trémie, garnitures de wagons-glacières, glacières de transports aériens, éléments de camions et d'autobus, gaines de rails de contact, péniches, panneaux de remorques et carrosseries réfrigérées de camions.

Section II



Quatre principes d'utilisation des PRF

Orientation unidirectionnelle de la fibre	Le pourcentage de renfort Fiberglas augmente la résistance dans le sens de l'orientation de la fibre		TYPES DE RENFORTS: stratifils PROCÉDÉS: pultrusion
Orientation bidirectionnelle de la fibre			TYPES DE RENFORTS: stratifils PROCÉDÉS: bobinage filamentaire TYPES DE RENFORTS: toiles tissées et mèches tissées PROCÉDÉS: application à la main
Orientation multidirectionnelle de la fibre			TYPES DE RENFORTS: Fils coupés, mats à fils continus et coupés PROCÉDÉS: moulage par compression et par injection, pulvérisation, sac sous pression, préforme

1. Résistance mécanique
La résistance mécanique de la pièce finie dépend surtout de l'effet combiné de *la quantité, du type et de la disposition* du renfort Fiberglas dans la pièce.

2. Rendement chimique, électrique et thermique
Le rendement chimique, électrique et thermique de la pièce dépend du choix et de la formulation de la résine et des autres éléments du plastique.

3. Sélection du matériau
La sélection du matériau, la conception et les exigences de production (taille de la pièce, forme, et taux de production désirés) déterminent le procédé technologique qui convient le mieux pour l'utilisation.

4. Coût/rendement
Le rapport coût/rendement, ou la somme des avantages obtenus, résulte d'une conception saine, d'un usinage adéquat et d'une soigneuse préparation de production, ainsi que d'un choix judicieux des matériaux et des procédés.

Premier principe: sélection du renfort Fiberglas pour sa résistance

1. Quantité de verre
Dans tout élément fait de plastique renforcé Fiberglas, la résistance augmente directement et essentiellement proportionnellement selon le pourcentage de renfort Fiberglas compris dans le poids total du composite. Plus elle renferme de verre, plus la pièce est résistante. La composition des matériaux de renfort Fiberglas doit être déterminée par les exigences de résistance prévues.

2. Disposition des fibres
Dans tout élément fait de plastique renforcé Fiberglas, la disposition des fibres – manière dont les fils sont individuellement placés – détermine la direction et le degré de résistance obtenus. Il y a trois types généraux d'orientation des fibres:

(a) *UNIDIRECTIONNELLE* – *assurant* la plus grande résistance dans le sens des fibres. Jusqu'à 80% de charge de renfort, par poids, est possible.

(b) *BIDIRECTIONNELLE* – quelques fibres sont placées de telle sorte qu'elles forment un angle avec le reste, comme c'est le cas pour le tissu. Cela donne différents degrés de résistance dans chaque sens d'orientation de la fibre. On peut obtenir jusqu'à 75% de charge Fiberglas, par poids, avec des renforts tissés.

(c) *MULTIDIRECTIONNELLE* – cette disposition donne essentiellement une résistance égale dans tous les sens. On peut obtenir de 10% à 50% de charge de renfort, par poids.

Les produits de renfort Fiberglas mentionnés ici sont décrits aux pages 12, 13 et 14.

On peut facilement se rendre compte du rapport entre la *quantité* de renfort Fiberglas et la *disposition* du renfort: plus les fibres sont orientées directionnellement, plus les charges de renfort sont grandes et par conséquent, plus grande est la résistance que l'on peut obtenir de la pièce finie, *dans le sens des fibres.* Plus la disposition est laissée au hasard, plus basse est la charge de renfort et par conséquent, moindre est la résistance qui en résulte.

Le diagramme de la page 10 illustre la façon dont la résistance de la pièce est influencée par le *pourcentage* de renfort Fiberglas en fonction du poids, ainsi que par *l'orientation* des fibres. Nous indiquons également les types de produits de renfort Fiberglas qui donnent la disposition directionnelle indiquée, ainsi que les méthodes de traitement les plus utilisées avec lesquelles ils sont compatibles.

Deuxième principe: choix du système de résine selon le rendement chimique, électrique et thermique

Les propriétés *chimiques, électriques et thermiques* désirées dictent le type de résine à choisir.

Il existe des résines utilisables dans les plastiques renforcés Fiberglas qui offrent à l'ingénieur-dessinateur une étendue de propriétés et satisfont aux conditions requises pour presque toute utilisation.

Des additifs et composés spéciaux peuvent être utilisés avec différents systèmes de résines pour donner des propriétés comme coloris, finition de surface, retard des flammes, résistance aux intempéries et faible retrait. D'autres additifs rehaussent la capacité de traitement des composites en accélérant ou en ralentissant la prise, en améliorant le démoulage et en aidant la production.

Les résines thermodurcissables les plus utilisées sont décrites pages 16, 17 et 18. Parmi celles-ci, les plus importantes sont les polyesters. Citons encore les époxydes, mélamines, phénoliques, silicones et phtalates de diallyle.

Thermodurcissables	**Procédés (voir section III)** Pulvérisation, application à la main, préformage, moulage par compression et par injection, bobinage filamentaire, pultrusion, moulage centrifuge, moulage à froid, comoformage.
Époxydes	Bobinage filamentaire, encapsulage, pultrusion, moulage centrifuge, application à la main.
Mélamines, phénoliques, silicones, phtalates de diallyle	Moulage par compression avec composé de moulage en vrac ou mélanges secs, encapsulage rarement injection (voir page 27).
Thermoplastiques	**Procédés (voir section III)** Moulage par injection, moulage par rotation

Les systèmes de résines thermoplastiques sont décrits à la page 18. Ils comprennent les acryliques, nylons, polyéthylènes, polystyrènes, polycarbonates, polyesters, vinyles, acrylonitrile de styrène, acrylonitrile-butadiène-styrène, fluorocarbones, et autres plastiques spécialisés offrant des propriétés chimiques ou thermiques inhabituelles.

Troisième principe: choix d'un procédé compatible avec le renfort Fiberglas et le système de résines

La souplesse de production d'un procédé particulier est souvent le facteur économique le plus important pour les plastiques renforcés Fiberglas. Taille de la pièce, taux de production et complexité de la forme sont les déterminants essentiels.

Par exemple: si l'on doit fabriquer un grand nombre de pièces à partir d'un ensemble de moules, il est probable que l'on obtiendra le coût de production le plus bas en procédant au moulage par compression ou par injection. Dans ces procédés, les presses, l'usinage et l'équipement de manutention automatisé peuvent accélérer les cycles de production et réduire les coûts de main-d'oeuvre. Inversement, si on n'a besoin que de quelques pièces, les procédés plus simples, comme l'application à la main ou la pulvérisation sont les méthodes les plus économiques, étant donné qu'elles impliquent généralement un usinage bon marché et un équipement de fabrication minimum.

De temps en temps, c'est la forme physique de la pièce qui dicte le procédé particulier à utiliser. Par exemple, des objets cylindriques sont souvent mieux fabriqués par moulage centrifuge ou bobinage filamentaire; des formes creuses complexes, par moulage par rotation; des éléments de construction ou autres à profil régulier et exigeant une résistance anormalement élevée, par pultrusion.

Quatrième principe: rapport coût/rendement optimum

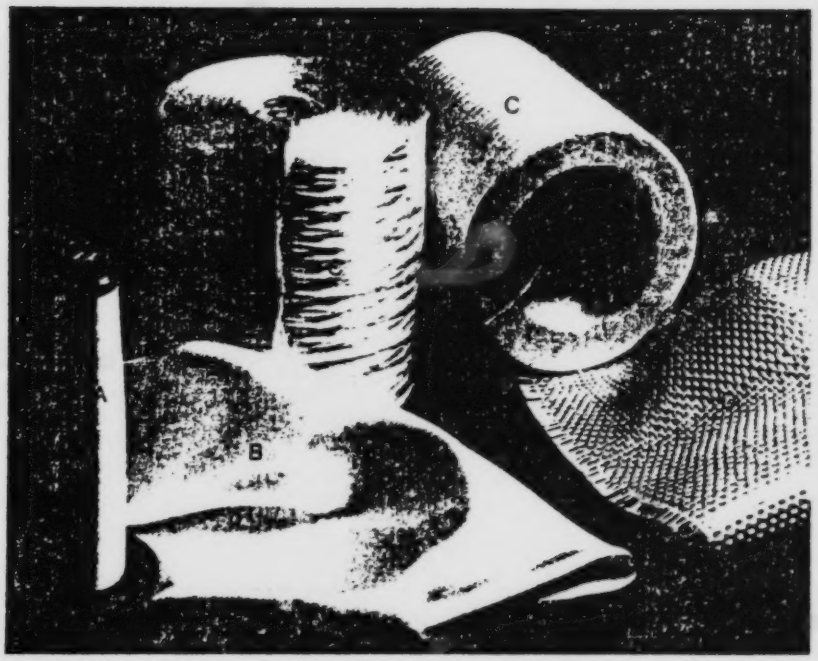
Le quatrième et dernier principe est d'obtenir un rapport coût/rendement maximum grâce à un dessin juste et intelligent. La section IV de ce manuel décrit une méthode de dessin et présente des suggestions qui peuvent donner d'excellents résultats de coût/rendement.

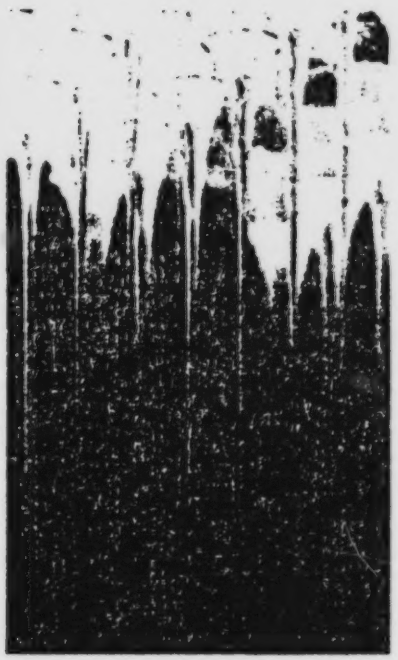
Essentiellement, un dessin approprié peut satisfaire les exigences maximales de rendement du produit fini lorsque l'ingénieur-dessinateur connaît le rendement total du renfort, le système de résines et la technologie du procédé.

En procédant étape par étape – conception initiale, développement et évaluation du prototype, raffinement du dessin, évaluation, pré-production et tests de production finale, on peut obtenir le rapport coût/rendement maximum.

Pour obtenir une assistance technique supplémentaire pour un programme de mise au point d'une pièce donnée, s'adresser à l'un des nombreux et compétents mouleurs à façon de l'industrie des PRF, ou à Fiberglas Canada Inc.

Renforts Fiberglas Canada





Les renforts Fiberglas se présentent sous plusieurs formes de base. Ces formes permettent une certaine souplesse du point de vue du coût, de la résistance, de la compatibilité avec le système de résines et du choix du procédé. Quelle que soit la forme définitive, tous les renforts Fiberglas ont pour origine l'atténuation ou l'étirage d'un monofilament de verre d'un four contenant du verre en fusion. Un grand nombre de ces filaments sont formés simultanément et réunis en un brin. On y applique un traitement de surface pour faciliter la transformation, conserver l'intégrité de la fibre et établir la compatibilité avec les systèmes de résines spécifiques. Ces brins sont soit enroulés pour donner des "formages" intermédiaires, qui sont ensuite transformés en divers types de renforts Fiberglas, soit directement transformés en produits de renfort.

Le stratifil est fourni sous forme de brins détors enroulés de manière à former un ensemble cylindrique. On peut obtenir des stratifils avec traitement de surface pour utilisation avec différents systèmes de résines et différents procédés.

Les stratifils Fiberglas présentent de bonnes caractéristiques de traitement dans l'ensemble, grâce à un mouillage rapide (pénétration de la résine dans le brin), une traction égale, et une résistance à l'abrasion au cours du traitement. On peut les couper nettement, et ils se dispersent uniformément dans toute la matrice au cours du moulage. Ils offrent d'excellentes propriétés mécaniques.

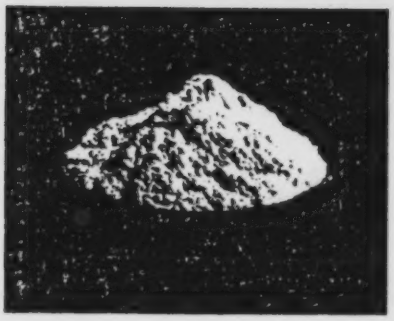
Le tissu stratifil est une lourde toile drapable fabriquée à partir de stratifils. Disponible en divers épaisseurs, largeurs, poids et orientations de résistance, le tissu stratifil assure un degré élevé de résistance aux grosses pièces moulées et est moins dispendieux que les tissages conventionnels.

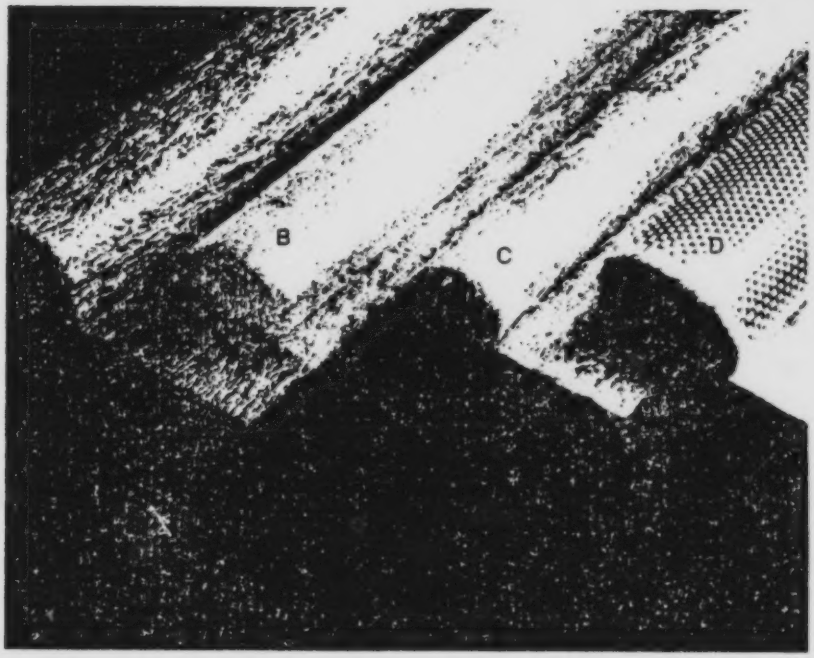
Les tissus de verre sont faits à partir de fils Fiberglas et sont disponibles dans une large gamme de propriétés, largeurs et longueurs. Les poids varient de 70 g/m² (2 oz/v²) à 2100 g/m² (60 oz/v²); l'épaisseur varie de .10 mm (.004") à 2.3 mm (.09"). Diverses orientations de résistance sont possibles.

Mat ou voile de surface; s'utilise conjointement aux mats et aux tissus de renfort pour donner un bon fini de surface. Très efficace pour cacher le motif de fibre du mat ou de la toile. On utilise aussi les mats de surfaçage comme couches intérieures des produits PRF résistants à la corrosion, ce qui donne une surface lisse au fini résineux.

Le fil Fiberglas (A) sert à produire des tissus de verre (B). Le stratifil est fourni en paquets non noyautés, de dimensions diverses. Le tissu stratifil se fait en de nombreux poids, largeurs et constructions.

On forme des filaments individuels Fiberglas en étirant le verre en fusion au travers d'une rangée de filières.





Les mats de renfort se font à partir de fils de Fiberglas, soit coupés, soit continus, disposés en un motif tressé. Les fils sont généralement maintenus ensemble par des liants résineux. On les utilise pour des pièces à résistance moyenne à profilé uniforme. Les mats de renfort à fils coupés ou à fils continus se font dans des poids variant de 300 g/m² (1 oz/pi²) à 900 g/m² (3 oz/pi²).

Les mats combinés formés d'une épaisseur de stratifil joint à une couche de fils coupés, peuvent s'obtenir auprès de diverses entreprises de transformation de renforts Fiberglas. Ces produits forment un renfort solide et drapable qui combine l'orientation bidirectionnelle de la fibre du stratifil à l'orientation multidirectionnelle du fil coupé. Ils épargnent du temps pour l'application à la main, étant donné que l'on peut placer deux couches dans le moule en une seule opération. D'autres combinaisons sont disponibles pour améliorer le fini de surface, comme pour les renforts à couches multiples.

Les fils coupés sont disponibles en diverses longueurs, de 6 mm (¼") à 48 mm (2"). Ils sont mélangés à des résines et autres additifs pour préparer des composés pour le moulage par compression, injection, encapsulage, ou autre procédé. Le renfort Fiberglas à fils coupés se fait avec de nombreux traitements de surface pour garantir la meilleure compatibilité avec la plupart des systèmes de résines thermodurcissables et thermoplastiques.

Le renfort à fils coupés plus courts convient mieux au mélange avec des systèmes de résines thermoplastiques, pour moulage par injection. Le renfort à fils coupés plus longs se mélange aux résines thermodurcissables pour moulage par compression et par transfert.

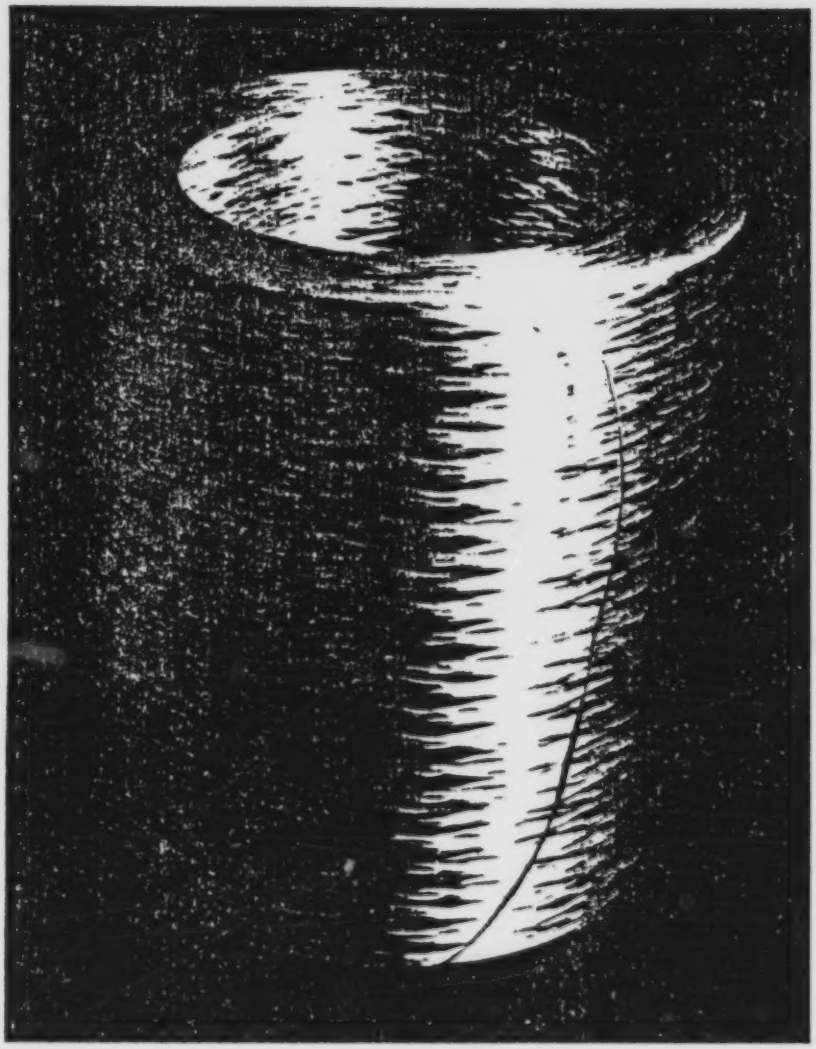
Les fibres broyées sont des longueurs de verre fibreux de .75 mm (1/32") à 3 mm (⅛"). Elles sont utilisées pour des renforts de pièces thermoplastiques nécessitant des résistances allant de faible à modérée et pour les charges et adhésifs.

Les fils coupés donnent une résistance élevée aux pièces moulées par compression et injection.

Les fibres broyées combinent propriétés de renfort à facilité de traitement, dans l'encapsulage ou le moulage par injection.

Mats de renfort Fiberglas: (A) mat a fils continus; (B) mat de surface; (C) mat à fils coupés; (D) mat combiné. Disponibles en différents poids, largeurs et constructions.

Renforts Fiberglas à haut rendement:



Les produits de renfort procédé 30 offrent les meilleures propriétés de bobinage et de manutention et excellente intégrité de brins lorsqu'on utilise de gros volumes de renfort Fiberglas.

Stratifils procédé 30 Le procédé 30 est un stratifil destiné tout particulièrement aux procédés à gros volume, comme bobinage filamentaire, la pultrusion et le tissage de toiles de renfort Fiberglas.

Le procédé 30 offre les avantages d'une calibration pour imprégnation rapide, de l'absence de caténaire et d'une haute intégrité de brins. Excellentes propriétés de bobinage et de manipulation avec formation minimale de bourre lorsqu'il passe au travers des oeillets de la bobine.

Des tissus de verre peuvent également être faits avec le **procédé 30.**

Autres formulations spéciales. Lorsque le produit fini nécessite des propriétés chimiques, thermiques ou mécaniques inhabituelles, certaines compositions spécialisées Fiberglas sont disponibles dans un grand nombre des formes indiquées aux pages précédentes. Celles-ci comprennent:

Le "S Glass"*, produit offrant un très bon rapport résistance-poids pour des utilisations militaires et aérospatiales critiques. Sa résistance à la traction est supérieure d'environ un tiers à celle du renfort Fiberglas normal ("E" Glass). On utilise des systèmes d'ensimage spéciaux.

Le "S2 Glass"* a la même composition de verre de base que le "S Glass", mais a différents systèmes d'ensimage à la fois pour les systèmes de résines polyesters et époxydes. Moins coûteux que le "S Glass".

Le verre filtré est un autre renfort spécial Fiberglas pour des utilisations à températures très élevés.. Il est spécialement traité pour donner un contenu élevé de silice, et est généralement vendu comme tissu de verre sous divers noms commerciaux. Tous ces renforts spéciaux permettent de choisir l'ensemble répondant le mieux aux différentes exigences d'utilisations critiques et de rapport coût/rendement recherchés.

*Marque déposée de O-CF Corp

Sélection des résines pour les PRF

Établissement des conditions requises de rendement chimique, électrique et thermique. Conformément au second principe fondamental de conception des plastiques et composites renforcés Fiberglas, le choix du système de résines à utiliser est basé sur la nécessité de satisfaire aux exigences de rendement chimique, électrique et thermique. Le tableau dépliant à la fin de ce manuel donne une idée de la gamme de résines thermodurcissables et thermoplastiques disponibles, avec leurs propriétés physiques. On peut obtenir des données plus approfondies auprès des fournisseurs de résines (y compris Fiberglas Canada Inc., l'un des principaux fournisseurs de résines polyesters).

Comme nous l'avons déjà indiqué, il y a deux catégories générales de résines: les *thermodurcissables* qui durcissent lorsqu'elles sont chauffées; et les *thermoplastiques*, qui sont souples lorsqu'elles sont chauffées et durcissent au refroidissement.

Nous donnons ci-dessous un résumé des systèmes de résines les plus utilisés, avec leurs propriétés générales. De plus amples détails se trouvent dans le tableau dépliant aux pages 39 à 42.

Thermodurcissables	**Propriétés**	**Procédés**
Polyesters Les propriétés indiquées s'appliquent également à certains polyesters formulés pour traitement thermoplastique de moulage par injection	Famille de résines très simples, universelles, économiques et d'un usage très répandu; elles ont de bonnes propriétés électriques, une bonne résistance chimique, tout spécialement aux acides	Moulage par compression Bobinage filamentaire Application à la main Moulage de mats Moulage au sac sous pression Pultrusion Moulage par injection Pulvérisation Moulage centrifuge Moulage à froid Comoformage Encapsulage
Epoxydes	Excellentes propriétés mécaniques, stabilité dimensionnelle, résistance chimique (spécialement aux alcalis), faible absorption d'eau, extinction automatique (lorsque halogénés), faible rétrécissement, bonne résistance à l'abrasion, excellente adhésion	Moulage par compression Bobinage filamentaire Application à la main Pultrusion Encapsulage Moulage centrifuge
Phénoliques	Bonne résistance aux acides, bonnes propriétés électriques (sauf résistance à l'étincelle), résistance élevée à la chaleur	Moulage par compression Laminage continu
Silicones	Résistance à la chaleur la plus élevée, faible absorption d'eau, excellentes propriétés diélectriques, résistance élevée à l'étincelle	Moulage par compression Moulage par injection Encapsulage
Mélamines	Bonne résistance à la chaleur, forte résistance aux chocs	Moulage par compression
Phtalates de diallyle	Bonne isolation électrique, faible absorption d'eau	Moulage par compression
Thermoplastiques	**Propriétés**	**Procédés**
Polystyrène	Faible coût, distorsion thermique modérée, bonne stabilité dimensionnelle, bonne rigidité, résistance aux chocs	Moulage par injection Laminage continu
Nylon	Forte distorsion thermique, faible absorption d'eau, faible élongation, bonne résistance aux chocs, à la traction et à la flexion	Moulage par injection Soufflage Moulage par rotation
Polycarbonate	Extinction automatique, résistance diélectrique élevée, très bonnes propriétés mécaniques	Moulage par injection
Acrylonitrile-styrène	Bonne résistance aux solvants, bonne résistance à long terme, belle apparence	Moulage par injection
Acryliques	Beau brillant, bonne résistance aux intempéries, bonne clarté optique et bon coloris; excellentes propriétés électriques	Moulage par injection Formage sous vide Moulage par compression Laminage continu
Vinyles	Excellente résistance aux intempéries, propriétés électriques supérieures, excellente résistance à l'humidité et chimique, extinction automatique	Moulage par injection Laminage continu Moulage par rotation
Acétals	Résistance à la traction et rigidité très élevées, stabilité dimensionnelle exceptionnelle, résistances chimique et à l'abrasion élevées, aucun solvant connu à température ambiante	Moulage par injection
Polyéthylène	Bonne solidité, léger, faible coût, bonne flexibilité, bonne résistance chimique, peut être "soudé"	Moulage par injection Moulage par rotation Soufflage
Fluorocarbones	Résistances chimique et à la chaleur très élevées, ne brûle pas, le plus bas coefficient de friction de tous les thermoplastiques, stabilité dimensionnelle élevée	Moulage par injection Encapsulage Pultrusion
Oxyde de polyphénylène modifié	Plastique d'ingénierie très solide, stabilité dimensionnelle supérieure, faible absorption d'humidité, excellente résistance chimique	Moulage par injection
Polypropylène	Excellente résistance à l'effort ou au fendillement, très léger, dur, surface résistant aux éraflures, peut être galvanisé; bonne résistance chimique et à la chaleur; exceptionnelle résistance aux chocs; bonnes qualités optiques	Moulage par injection Laminage continu Moulage par rotation
Polysulfone	Bonne transparence, bonnes propriétés mécaniques, résistance à la chaleur et propriétés électriques à températures élevées; peut être galvanisé	Moulage par injection

Résines polyesters Fiberglas Canada

Ce qui suit est un guide des types de résines polyesters les plus couramment utilisés fournis par Fiberglas Canada Inc.

Type de polyester	Propriétés	Utilisations types
Usage général	Rigidité	Plateaux, bateaux, réservoirs, boîtes, bagages, sièges
Flexibles et semi-rigides	Solidité, bonne résistance aux chocs, résistance à la flexion élevée et faible module de flexion	Equipement d'amortissement des vibrations, couvercles et protection de machines, casques de sécurité, encapsulage de pièces électroniques, carrosseries et bateaux, gels, composés de rapiéçage
Stables à la lumière et résistantes aux intempéries	Résistances aux intempéries et à la détérioration par les rayons ultraviolets	Panneaux de construction, vitrage, verrières
Résistantes aux produits chimiques	La plus forte résistance chimique parmi les polyesters, excellente résistance aux acides, résistance moyenne aux alcalis	Tuyaux, réservoirs, conduits, cheminées
Retardent les flammes	A extinction automatique, rigides	Panneaux muraux, réservoirs de carburants, pièces électriques
A forte distorsion thermique	Température de service allant jusqu'à 500°F, rigides	Pièces d'avions et autres pièces soumises à des températures élevées
Faible retrécissement, profil bas	Bonne reproduction de surfaces et dimensions contrôlées par le moule	Pièces décoratives pour automobiles et appareils

La famille très utilisée de résines thermodurcissables qui font partie de la classe des polyesters, représente la majorité de toutes les résines utilsées dans les plastiques renforcés Fiberglas. Premier système de résines à être largement utilisé dans les PRF, les polyesters ont trouvé des applications dans de nombreux domaines; ils conviennent, en fait, à presque tous les procédés disponibles où l'on emploie une résine thermodurcissable.

Les polyesters offrent les avantages d'un bon équilibre entre les propriétés mécaniques, chimiques et électriques, stabilité dimensionnelle, facilité de manutention et coût peu élevé. Il existe des polyesters spécifiquement conçus pour des procédés à basse ou haute température, pour prise à température ambiante, pour des produits finis flexibles ou rigides.

On peut facilement incorporer des additifs aux systèmes de résines polyesters pour leur donner des propriétés qui retardent les flammes, d'excellents finis de surface, la pigmentation, un rétrécissement réduit, la résistance aux intempéries et autres.

Les gels à formulation de résine polyester spécialisée sont couramment utilisés dans les procédés d'application à la main et de pulvérisation pour donner un fini de surface côté moule très raffiné, avec une apparence et des propriétés de résistance aux intempéries excellentes. Solide et élastique, le gel apporte aussi à la surface du laminé une bonne résistance aux chocs et à l'abrasion. Les gels peuvent être pigmentés pour donner à la pièce moulée la couleur désirée. Ils sont vaporisés sur le moule avant le début de l'application à la main ou de la pulvérisation.

Le gel est appliqué sur le moule avant la fabrication du laminé.

La chimie des polyesters

La résine polyester est généralement fournie au mouleur sous forme liquide, en un mélange de résine et d'un monomère liquide (généralement le styrène). La quantité de monomère est le principal facteur déterminant la viscosité de la formulation de résine. L'ajout d'un catalyseur et l'activation qui s'ensuit (généralement par la chaleur) provoquent la réaction appelée "réticulation", selon laquelle le polyester et le monomère deviennent un polymère solide, à trois dimensions. Ce catalyseur est généralement un peroxyde organique.

L'achèvement de cette réaction dépend à la fois de la formulation et de l'équilibre entre durée et température de la formule de résine choisie.

On utilise également (dans les systèmes de résines pour moulage à température ambiante) un accélérateur, qui favorise l'action catalytique lorsqu'il n'y a pas de chaleur disponible ou lorsqu'elle n'est pas souhaitée en raison d'autres facteurs de procédé.

La pression n'est pas nécessaire pour la prise, mais dans de nombreux cas, elle contribue à la production d'une surface lisse, à la densité du laminé, à la résistance de la pièce et à une prise plus rapide.

On peut aussi utiliser des inhibiteurs pour contrôler encore davantage le cycle de prise et pour apporter une vie adéquate à la formule de résine.

La prise d'un thermodurcissable se produit en deux étapes différentes. La première est la formation d'un gel mou. Tout de suite après gélification, la prise se fait rapidement avec évolution de chaleur. Cette "chaleur exothermique" peut être considérable et doit être convenablement contrôlée. La prise est terminée lorsque le lamine est entièrement durci

Les résines polyesters peuvent être formulées pour apporter des caractéristiques de traitement spéciales, comme:

Résistance à chaud, qui permet aux moulages chauds d'être facilement démoulés sans perdre leur stabilité dimensionnelle ni leur forme.

Faible chaleur exothermique, pour des laminés épais, sans vide, qui produisent peu de chaleur pendant la prise. Ceci est tout particulièrement important dans l'encapsulage d'éléments électroniques

Vie prolongée, pour les gros moulages complexes où la résine doit pouvoir demeurer "coulable" pendant un certain temps au cours du procédé de moulage

Séchage à l'air, pour permettre une prise qui ne colle pas à la température ambiante, ce qui facilite le moulage de très grosses pièces comme bateaux ou piscines.

Thixotropie, propriété de la résine qui lui permet de résister à l'écoulement à partir d'une surface verticale. Cette propriété est importante lorsqu'on utilise les méthodes de pulvérisation ou application à la main pour bateaux, piscines ou garnitures de réservoirs.

Additifs pour conditions spéciales imposées par l'utilisation: on peut ajouter à la formule de résine polyester d'autres produits chimiques ou matériaux pour donner au moulage fini les propriétés particulières qu'exigent les utilisations finales. Il s'agit des additifs très utilisés suivants:

Pigments, qui peuvent donner presque n'importe quelle couleur ou teinte à la pièce finie, ou au gel d'un laminé obtenu par pulvérisation ou application à la main.

Charges, habituellement des matériaux inorganiques ou inertes qui peuvent influer favorablement sur l'apparence de surface, la 'moulabilité', et le coût.

Produits retardant les flammes, souvent exiges lorsque l'homologation du Laboratoires des Assureurs pour pièces porteuses de courant (appareils électriques) est nécessaire.

Produits absorbant les rayons ultra-violets, que l'on ajoute aux mélanges de résines lorsque les produits finis doivent supporter une exposition prolongée aux rayons du soleil

Agents de démoulage, qui peuvent soit être appliqués au moule, soit mélangés à la résine pour faciliter le retrait de la pièce

Additifs pour faible retrait et profil bas, généralement des résines thermoplastiques que l'on ajoute à la formule polyester pour donner à la pièce moulée un minimum d'ondulation de surface et un faible retrait. Ces additifs éliminent la nécessité de traitement après moulage, permettant ainsi d'épargner en équipement et en main-d'oeuvre.

Autres systèmes de résines

Résines époxydes:

Les époxydes offrent une diversité de produits et de choix de procédés au-delà des moulages par transfert ou compression, ou de l'encapsulage.

Les époxydes présentent une meilleure résistance que les polyesters à la corrosion par les solvants et alcalis, mais une moindre résistance aux acides; leurs rapports résistance mécanique/poids et leur stabilité dimensionnelle sont de bons à excellents. Les propriétés d'isolation électrique sont également bonnes. Les époxydes sont donc idéales pour des applications impliquant des températures élevées; certaines formulations spéciales offrent un bon rendement à des températures de service atteignant 275°C (550°F).

Les époxydes ne sont pas aussi économiques que les polyesters, mais leur gamme étendue de propriétés peut en faire les résines au rapport coût/rendement préféré dans certaines utilisations critiques.

La prise des époxydes se fait à l'aide de durcisseurs pour former une solide structure réticulée. Avec les systèmes de résines époxydes, on peut utiliser des pigments, des produits pour retarder les flammes et d'autres additifs. Elles peuvent être formulées pour prise à température ambiante, mais on utilise plus couramment la chaleur pour faire prendre la résine si l'on désire obtenir les propriétés mécaniques finales.

Les époxydes se prêtent non seulement aux techniques de moulage par contact, mais à nombre de procédés de moulage spéciaux, comme par exemple le bobinage filamentaire et la pultrusion.

Autres résines thermodurcissables

Les autres systèmes de résines thermodurcissables figurant au tableau de la page 15 sont généralement formulés avec des renforts Fiberglas à fils coupés ou fibres broyées pour des applications de moulage par compression et par transfert. Leurs propriétés qui souvent les recommandent pour des utilisations spéciales, sont données en détail au tableau dépliant des pages 39 à 42.

Résines thermoplastiques

L'utilisation de thermoplastiques renforcés Fiberglas, moulés par injection, tout spécialement dans l'industrie automobile et de l'électroménager, prend de plus en plus d'ampleur. Cela est dû à la souplesse de conception, aux taux et volumes de production très élevés et à la possibilité de créer des formes compliquées à l'aide des thermoplastiques renforcés Fiberglas.

Tous les thermoplastiques peuvent être efficacement renforcés avec des fibres de verre, rehaussant ainsi leurs caractéristiques de rendement, et améliorant le rapport coût/rendement. On peut souvent améliorer une résine thermoplastique de coût moindre en y ajoutant un renfort Fiberglas si bien qu'elle offrira les caractéristiques de rendement supérieures d'une resine plus coûteuse.

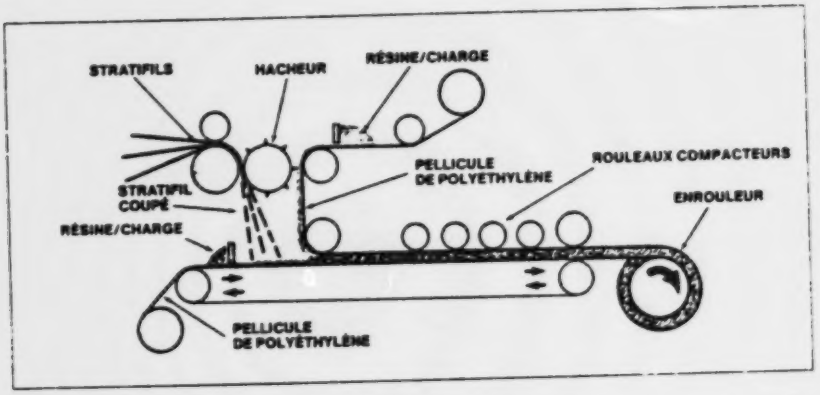
Un autre point significatif est que l'ajout d'un renfort Fiberglas à de nombreuses résines thermoplastiques apporte suffisamment de résistance et de stabilité dimensionnelle à la pièce pour permettre au composite thermoplastique renforcé de concurrencer efficacement la tôle emboutie et les métaux coulés. Ici, la résistance à la corrosion est la couleur incorporée au moulage des plastiques renforcés Fiberglas offrent également d'importants avantages de conception.

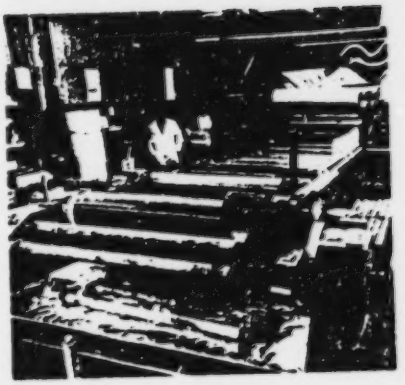
La liste des thermoplastiques qui sont maintenant renforcés avec des fibres de verre dans le moulage par injection est longue, et comprend des résines qui offrent une très large gamme de propriétés mécaniques, chimiques, électriques et thermiques. Quelques-unes de ces propriétés ont déjà été brièvement indiquées; les spécifications complètes de rendement se trouvent au dépliant à la fin de ce manuel.

De même que pour les thermodurcissables, les composites thermoplastiques incluent généralement pigments, charges, agents de démoulage ou lubrifiants et parfois d'autres additifs pour des buts particuliers.

Alors que le moulage par injection demeure le principal procédé de moulage des thermoplastiques renforcés Fiberglas, de récents développements dans le moulage par rotation et le soufflage augmentent les possibilités d'application des thermoplastiques renforcés Fiberglas dans d'autres domaines.

Plastiques renforcés Fiberglas prêts pour le moule





L'utilisateur important des plastiques renforcés Fiberglas préfère souvent créer son propre mélange de renfort, résine et additifs, en fonction des exigences particulières de l'utilisation. Cela est tout particulièrement vrai dans des procédés comme l'application à la main, la pulvérisation et certains autres. Pour le mouleur par compression et le mouleur par injection toutefois, divers composites de renfort-résine "prêts à mouler" sont disponibles. Ces composites diminuent le coût de développement, et utilisent l'expertise des fournisseurs de composés pour éliminer la nécessité de formulateurs experts.

Composé de moulage en feuille

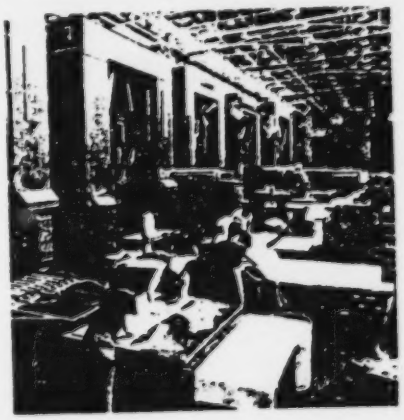
L'une des importantes découvertes de la technologie des plastiques renforcés Fiberglas au cours des dernières années est la mise au point d'un composé de moulage en feuille (CMF). Combinant un excellent contrôle de résine à une intégrité de fibre élevée et à des fibres longues, le CMF a ouvert la voie à d'innombrables applications pour lesquelles la technologie de moulage par compression ne pouvait jusque-là offrir les propriétés mécaniques nécessaires, ni la complexité de pièces. Il s'est révélé très efficace pour les éléments extérieurs des automobiles, les pièces d'appareils, comme les plateaux d'évaporation et cloisons de climatiseurs et autres gros éléments exigeant un fini de surface très raffiné, une complexité de dessin et de remarquables propriétés mécaniques.

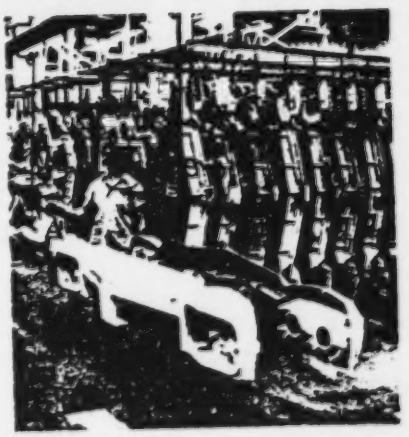
Le CMF est un composite de résine renforcée Fiberglas intrégré, que l'on peut fabriquer par un procédé très automatisé à écoulement continu. Un stratifil Fiberglas est haché à la longueur désirée – jusqu'à 48 mm (2"), et déposé sur une couche de résine polyester-charge, qui se déplace sur un rouleau de pellicule de polyéthylène. Une fois que le dépôt est terminé, un second rouleau de pellicule de polyéthylène transportant la pâte de résine se joint au premier rouleau, formant ainsi un sandwich continu de verre et de résine. Le tout est réuni et roulé sous tension contrôlée en rouleaux de taille standard au poste d'enroulement de la machine.

Les longueurs de fibres plus longues que l'on peut obtenir grâce à l'utilisation du CMF offrent des propriétés mécaniques beaucoup plus élevées par rapport aux pièces moulées par compression en vrac – tout spécialement celles qui présentent un profil mince. Un contrôle strict du poids et de la taille de la charge permet de produire des pièces moulées avec très peu de "bavures", d'où très peu de gaspillage et d'importantes économies. Le CMF est normalement mis en couches avant moulage pour faciliter le moulage des pièces dont le profil change de façon marquée.

Les fournisseurs de composé de moulage en feuille ont un nombre pour ainsi dire illimité de combinaisons résine-verre pouvant satisfaire presque toute utilisation finale.

On peut trouver du CMF pigmenté à faible retrait et faible profil. Certains de ces composés brevetés retardent les flammes et présentent d'excellentes propriétés électriques.





Des rouleaux de composé de moulage en feuille donnent de grandes longueurs de fibres et une plus grande résistance des pièces. Après vieillissement, les rouleaux sont prêts à être utilisés sur les presses.

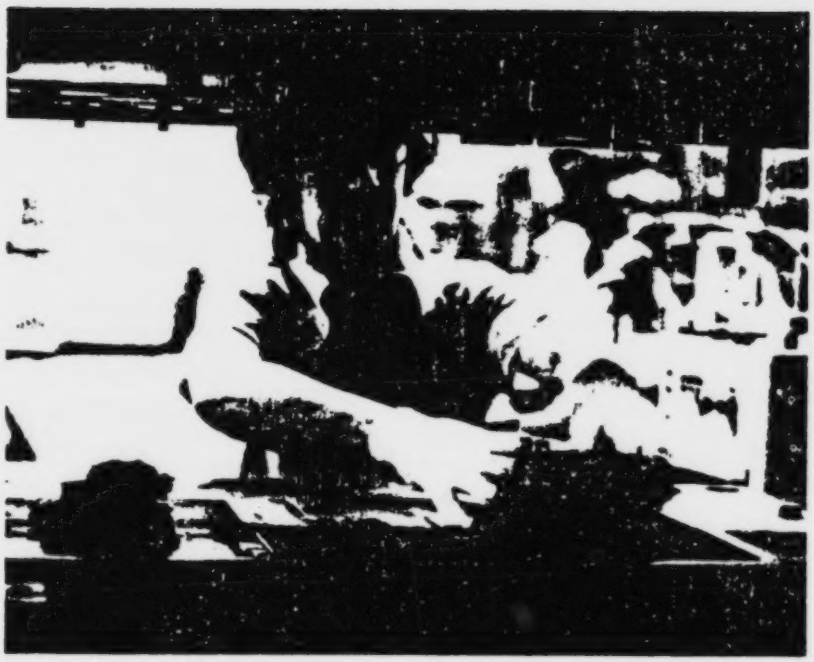
Le CMF se coupe facilement à la taille désirée, se manipule facilement soit à la main, soit automatiquement.

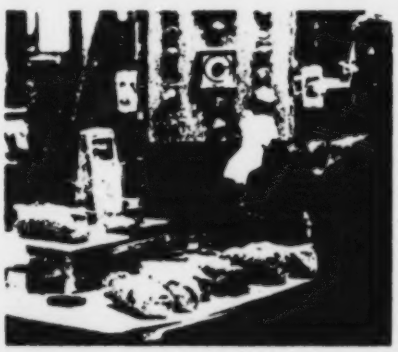
Les pièces en PRF à forte résistance peuvent se mouler par compression à des taux production rapides grâce au CMF.

Composé de moulage en vrac

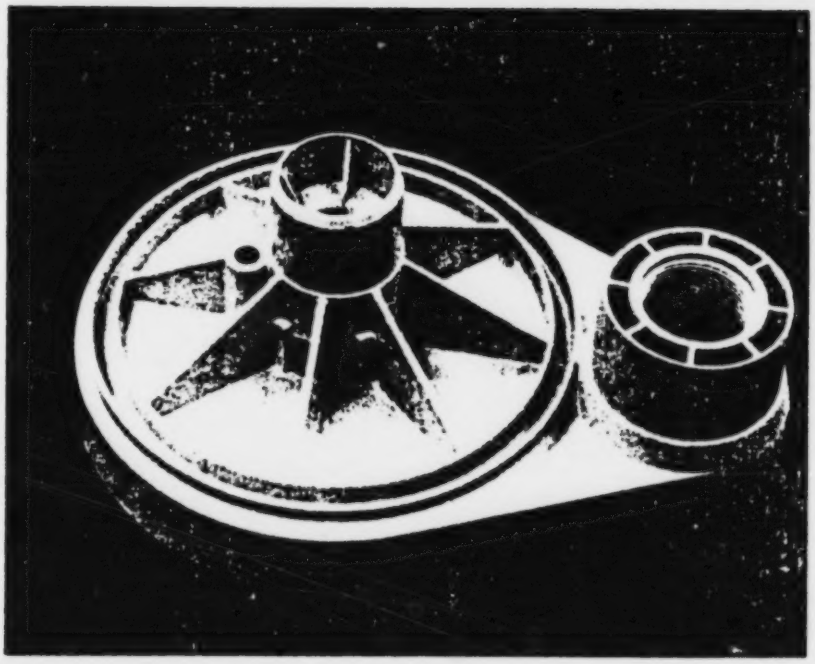
Le composé de moulage en vrac (CMV) est un mélange de fibres de verre courtes de 3 mm (⅛") à 30 mm (1 ¼") et de résine contenant charge, catalyseur, pigment et autres additifs selon les exigences de l'utilisation finale (comme produits retardant les flammes, résines à faible retrait ou faible profil). Ce matériau pré-mélangé, dont la consistance est celle de la pâte à modeler, peut se fournir en vrac ou peut s'étirer en des formes semblables à des cordes pour faciliter la manutention. Une fois pesé, le CMV est placé dans le moule chauffé qui est alors fermé et soumis à la pression. La pièce terminée et prise, est retirée du moule après un intervalle allant de quelques secondes à quelques minutes selon la taille et l'épaisseur de la pièce.

On peut aussi trouver commercialement le composé de moulage en vrac dans diverses combinaisons de résine, additifs et renforts Fiberglas pour satisfaire à une grande variété d'exigences du produit fini dans des applications à volumes élevés, pour lesquelles la finition, la stabilité dimensionnelle, la complexité de forme et les propriétés mécaniques générales sont importantes.



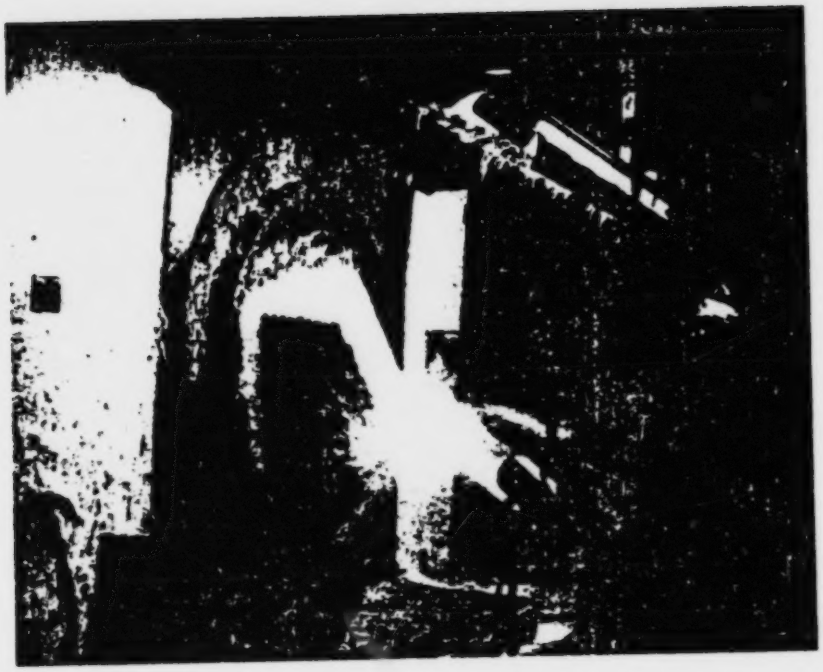


Une fois qu'on a pesé la charge, on peut façonner le CMV pour convenir au moule, à la main si nécessaire, pour fournir exactement la dose nécessaire au remplissage du moule.



Les pièces de CMV moulées par compression présentent excellent fini de surface, stabilité dimensionnelle et bonne résistance générale.

Un renfort Fiberglas de fils coupés et une résine polyester, avec les additifs nécessaires, sont mélangés au composé de moulage en vrac.



Préformes

La préforme est une troisième méthode de préparation des formes "prêtes à mouler" de renfort Fiberglas et de résine pré-mélangée. Il s'agit d'un mat de fils Fiberglas coupés avec liant pour permettre à la préforme de garder sa forme – la forme approximative du produit à mouler – pendant formage et manutention.

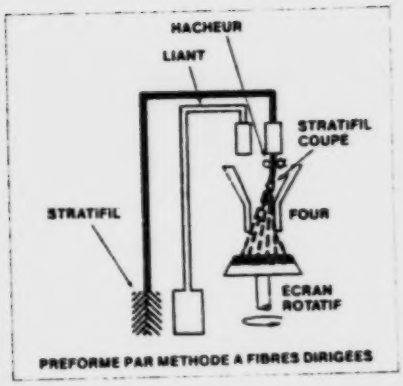
Préformes produites par la méthode à fibre dirigée, sur un écran de préformage rotatif, prêtes pour moulage par compression.

Il existe deux méthodes de production des préformes

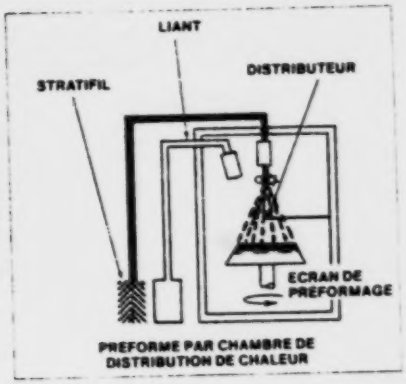
1. La méthode à fibre dirigée, selon laquelle un stratifil Fiberglas est coupé en longueurs de 24 mm (1") à 48 mm (2"), et soufflé avec le liant sur un écran métallique rotatif qui a à peu près la forme de la pièce à mouler. Les fibres sont maintenues en place par succion. Après prise au four, la préforme est prête pour le moule. On ajoute la résine à la préforme dans le moule.

2. La méthode par chambre de distribution de chaleur. Cette méthode ressemble à celle à fibre dirigée, mais implique la distribution des fils coupés et du liant dans une chambre de distribution de chaleur où ils sont aspirés sur l'écran de préformage rotatif.

Ces méthodes de préformage sont préférées pour les applications concernant des pièces moyennes à grandes, ayant un profil relativement régulier et des concentrations assez élevées de renfort Fiberglas – comme plateaux, chaises, panneaux, casques protecteurs et boîtiers.



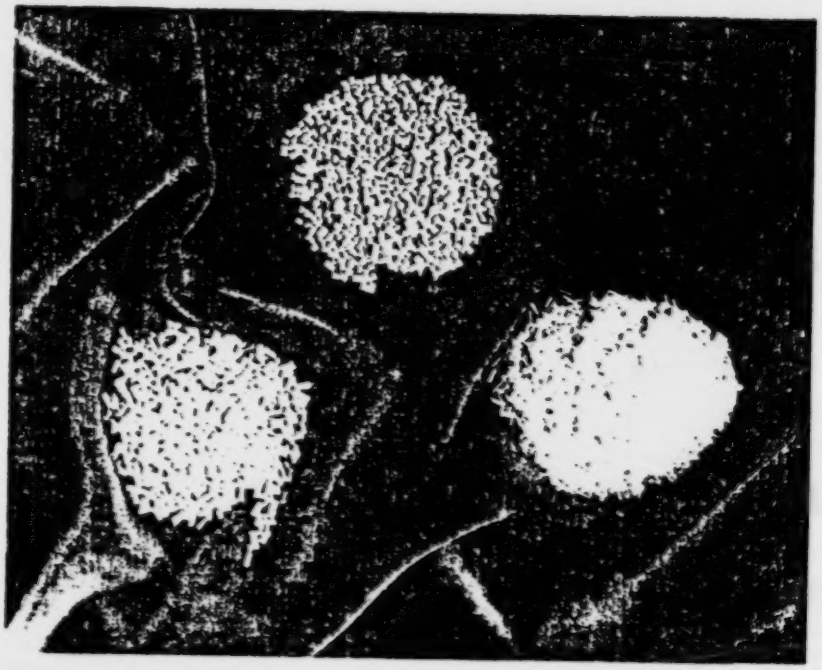
PREFORME PAR METHODE A FIBRES DIRIGEES



PREFORME PAR CHAMBRE DE DISTRIBUTION DE CHALEUR

Dans le moulage par préforme, on ajoute la plus grande partie de la résine juste avant le moulage, ou après que la préforme soit placée à l'intérieur du moule. Ce n'est donc pas une méthode de moulage distincte, mais une façon d'arranger les matériaux "prêts pour le moule".

Formulations thermoplastiques



Comme c'est le cas pour les thermodurcissables, il existe de nombreuses formulations pré-mélangées de renfort Fiberglas et de résine thermoplastique que l'on peut se procurer auprès des entreprises de transformation, y compris Fiberglas Canada. Ces formulations permettent à l'utilisateur d'éviter des frais d'investissements, des coûts de traitement et de l'espace d'usine consacré au mélange et à l'équipement de composition. Elles lui fournissent également des composés précisément formulés, de qualité contrôlée et qui peuvent être automatiquement alimentés dans la machine de moulage par injection.

A. Mélanges en granules: Ceux-ci se présentent dans de nombreux rapports strictement contrôlés, de renfort Fiberglas/résine, et avec additifs spécifiés, tels que pigments, produits retardant les flammes, stabilisateurs et lubrifiants.

Ces granules sont disponibles dans presque tous les thermoplastiques courants de moulage par injection, dans une gamme variée de coloris.

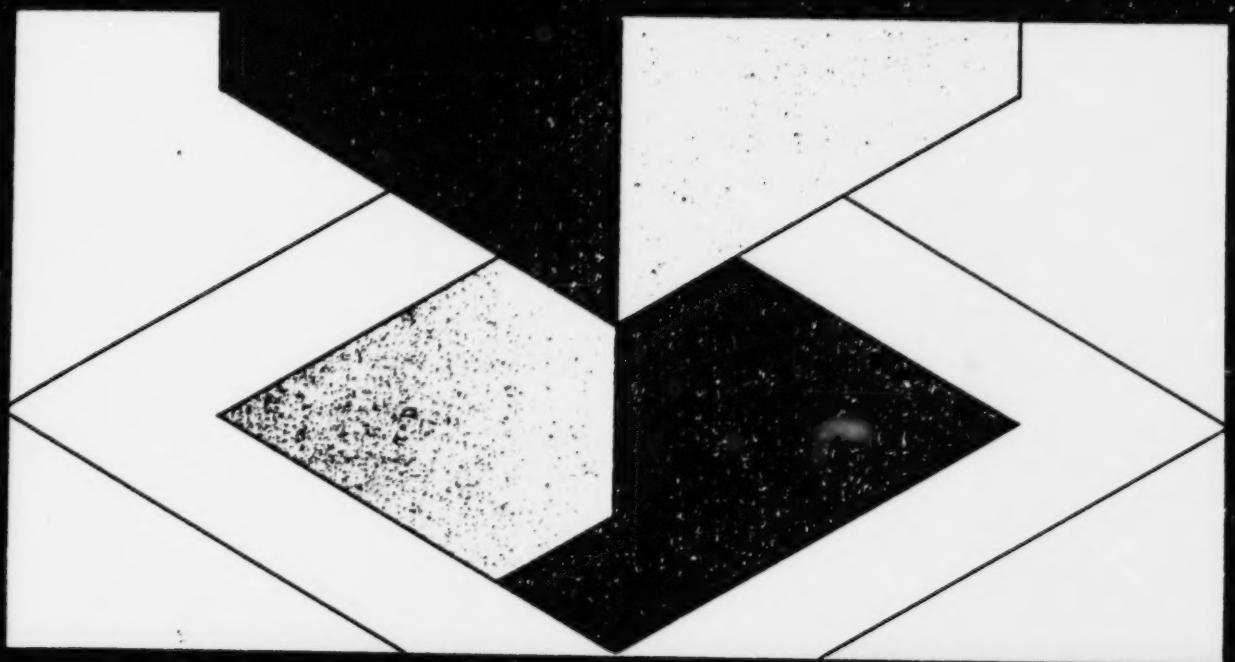
B. Concentrés: Ils sont semblables aux mélanges Fiberglas/résine en granules, mais ont des pourcentages très élevés de verre par rapport à la résine – jusqu'à 80 pour cent par poids (comparé à de 10 à 40 pour cent – pourcentage normal dans les granules). Les granules concentrés sont mélangés aux granules thermoplastiques non renforcés pour obtenir le rapport verre-résine désiré dans la pièce moulée.

C. Mélanges secs: Ce sont des formulations mélangées mécaniquement disponibles en de nombreux rapports de renfort Fiberglas/granules de résine, avec additifs spécifiés, tels que pigments, produits retardant les flammes, stabilisateurs et lubrifiants.

On obtient le mélange en combinant les quantités correctes d'ingrédients dans un mélangeur à tambour.

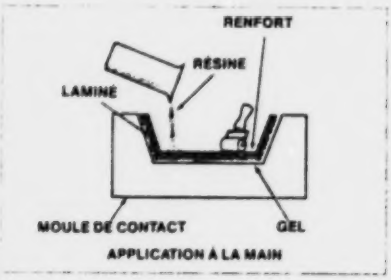
Avec ces formulations, le mouleur par injection peut choisir un composé de plastique renforcé Fiberglas qui satisfait précisément ses besoins d'utilisation en ce qui concerne la résistance aux chocs, le fini de surface, la couleur ou toute autre propriété mécanique ou chimique recherchée.

Section III



Méthodes de moulage au contact:

Application à la main:



Méthode de moulage au contact, pour des volumes faibles à moyens, convenant à la fabrication de bateaux, réservoirs, boîtiers et panneaux muraux pour prototypes, et pour autres grosses pièces nécessitant une résistance élevée.

Description du procédé
On applique d'abord un gel pigmenté sur le moule au moyen d'un pistolet, pour obtenir une surface de haute qualité. Lorsque le gel est devenu collant, on applique à la main le renfort Fiberglas (généralement mat ou tissu) sur le moule. La résine de base s'applique en versant, brossant ou pulvérisant. On se sert de racloirs ou de rouleaux pour densifier le laminé, en mouillant complètement le renfort avec la résine, et en éliminant les bulles d'air. Pour augmenter l'épaisseur on ajoute des couches de mats ou de mèches à fils continus Fiberglas et de la résine.

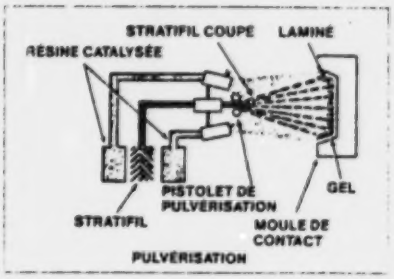
On ajoute au système de résine des catalyseurs et des accélérateurs pour permettre à la résine de prendre sans chaleur extérieure. La quantité de catalyseur et accélérateur dépend du temps de travail nécessaire et de l'épaisseur globale de la pièce finie.

Le laminé peut être noyauté ou renforcé avec des alvéoles, du balsa, de la mousse de plastique ou d'autres matériaux pour réduire le poids ou assurer le flottage.

Systèmes de résines:
Polyesters tout usage, durcissant à température ambiante, qui ne coulent pas sur des surfaces verticales. Certaines époxydes sont également utilisées.

Moules:
Simples, à une seule cavité, d'une seule pièce, soit mâle soit femelle, de n'importe quelle taille (on peut utiliser les méthodes par sac à dépression, sac sous pression, ou par autoclave pour accélérer la prise, augmenter le contenu de verre, et améliorer le fini de surface hors du moule – voir page suivante).

Principaux avantages:
C'est la méthode la plus simple, offrant un faible coût d'usinage, un traitement simple, une gamme étendue de tailles de pièces. Les modifications s'effectuent facilement. Investissement d'équipement minimum. Lorsque l'opérateur est expert, on peut obtenir de bons taux de production et une qualité uniforme.



Méthode pour des volumes de faibles à moyens, à moule ouvert, similaire à la méthode d'application à la main, en ce qu'elle convient pour fabriquer bateaux, réservoirs, ensembles douches/baignoires et autres formes simples, de moyennes à grandes, comme toits de camions, capots d'aération, et coffres d'étalages réfrigérés à usage commercial. La pulvérisation permet d'obtenir une plus grande complexité de formes que l'application à la main.

Description du procédé:
Passage d'un stratifil Fiberglas dans un pistolet de pulvérisation. Ce dispositif dépose simultanément les fils coupés et la résine catalysée sur le moule. Le laminé ainsi déposé est densifié par des rouleaux ou racloirs pour éliminer l'air et faire complètement pénétrer la résine dans les brins du renfort. On peut ajouter des couches de stratifils coupés et de résine pour augmenter l'épaisseur. La prise se fait généralement à température ambiante, ou peut être accélérée par une application modérée de chaleur.

De même que pour l'application à la main, on peut obtenir un excellent fini de surface en pulvérisant tout d'abord un gel sur le moule avant de procéder à la pulvérisation sur la couche inférieure. On ajoute parfois un tissu de verre au laminé pour une résistance à orientation spécifique. Des matériaux de noyautage sont aussi facilement incorporés.

Systèmes de résines:
Polyesters tout usage, à prise à température ambiante; polyesters à prise sous faible chaleur.

Moules:
Simples, à une seule cavité, habituellement monobloc, mâle ou femelle, comme les moules pour application à la main. Les moules peuvent parfois être assemblés en plusieurs pièces, puis démontés lorsqu'on retire la pièce. Cette technique est utile lorsque la pièce est très complexe.

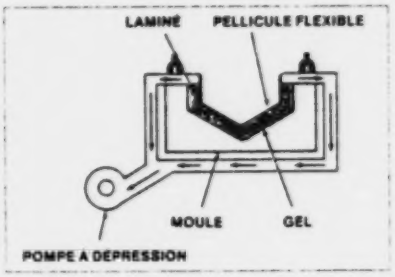
Principaux avantages:
Usinage simple et bon marché, traitement simple; l'équipement portatif permet le façonnage sur place; il n'y a pour ainsi dire aucune limitation de taille. Le procédé peut être automatisé.

Pour obtenir des moules de contact des propriétés mécaniques supérieures...

On peut améliorer la surface hors-moule et accélérer la prise des pièces produites par moulage au contact, par les techniques suivantes.

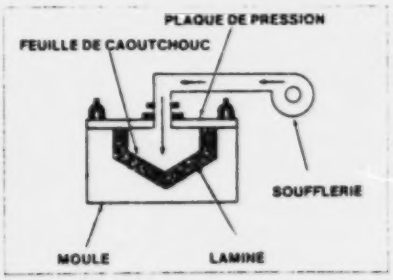
Sac à dépression:

On place une pellicule flexible (PVA ou cellophane) par-dessus l'application à la



main ou la pulvérisation une fois terminée, on scelle ses joints, et on fait le vide. La pression atmosphérique élimine le vide dans le laminé, et expulse l'excès de résine et d'air hors du moule. L'apport de pression se traduit en outre par une plus grande concentration de verre et offre une meilleure adhérence entre les couches de la construction en sandwich.

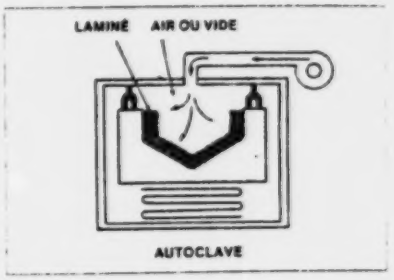
Sac sous pression:



On place une feuille de caoutchouc façonnée contre les couches de résine et de fibres et on crée une pression entre la feuille de caoutchouc et une plaque de pression (on peut appliquer de la vapeur pour chauffer la résine afin d'accélérer la prise).

La pression élimine les vides et expulse l'excès de résine et d'air du laminé, le densifiant et améliorant le fini de surface hors-moule. Ce procédé n'est pas compatible avec les moules mâles.

Autoclave:

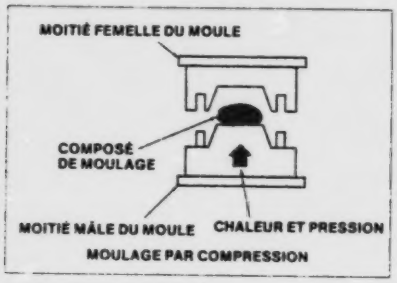


On peut modifier encore davantage le procédé par sac à dépression ou sac sous pression en utilisant un autoclave qui fournit de la chaleur et de la pression supplémentaires, produisant ainsi une plus grande densification du laminé et une prise plus rapide. Ce procédé est généralement utilisé pour la production de laminés à haut rendement utilisant des systèmes de résines époxydes pour les utilisations aéronautiques et aérospatiales.

Ces moulages par contact se caractérisent par un usinage simple de matériaux se travaillant facilement comme plâtre, bois, tôle ou plastique renforcé Fiberglas. Les pièces ont un côté très bien fini (côté contre le moule). La taille des pièces peut varier. Les propriétés physiques peuvent être très élevées, car l'emploi de renforts tissés permet d'obtenir un rapport verre-résine très élevé.

Méthodes par moules appareillés:

Moulage par compression:



MOULAGE PAR COMPRESSION

Méthode à fort volume et à pression élevée, qui convient au moulage de pièces en plastiques renforcés Fiberglas, complexes et à forte résistance. On peut mouler d'assez grosses pièces avec excellente finition. On utilise normalement des résines thermodurcissables.

Description du procédé:
Des moules appareillés sont montés dans une presse de moulage mécanique modifiée ou hydraulique. On place dans le moule une charge pesée de composé de moulage en feuille ou en vrac, une "préforme", ou un mat Fiberglas avec résine ajoutée à la presse. (Dans le cas d'une préforme ou d'un mat, on peut ajouter la résine avant ou après que le renfort soit placé dans le moule; cela dépend de la configuration de la pièce). On ferme les deux moitiés du moule et on applique chaleur et pression – de 107°C (225°F) à 160°C (320°F), de 1 MPa (150 lb-po^2) à 14 MPa (2,000 lb-po^2). En fonction de l'épaisseur, de la taille et de la forme de la pièce, les cycles de prise vont de moins d'une minute à environ cinq minutes. On ouvre le moule et on retire la pièce finie. Exemples typiques de pièces: avant d'automobiles, boîtiers d'appareils et éléments de structure, meubles, éléments électriques, boîtiers et pièces de machines de bureau.

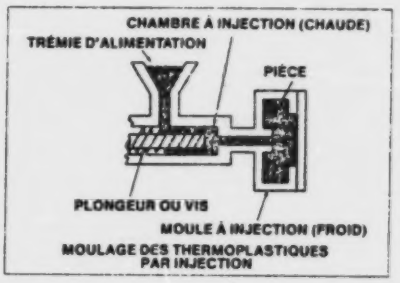
Systèmes de résines
Polyesters (mélangés au renfort Fiberglas, comme composé de moulage en feuille, en vrac, préforme ou mat) tout usage, flexibles ou semi-rigides, résistants aux produits chimiques, retardant les flammes, à forte distorsion thermique; également phénoliques, mélamines, silicones, phtalates de diallyle, quelques époxydes.

Moules
Moules à cavité simple ou multiple, durcis et chromés, généralement noyautés pour chauffage à la vapeur ou à l'huile chaude; on utilise parfois la chaleur électrique. On prévoie souvent la possibilité de pièces rapportées ou autres raffinements. Les moules peuvent être en acier coulé ou forgé, fonte d'acier ou d'aluminium.

Principaux avantages
C'est la méthode de moulage thermodurcissable qui permet le plus fort volume et la plus grande uniformité de pièces. Le procédé peut être automatisé. On peut obtenir une grande souplesse de conception des pièces, de bonnes propriétés mécaniques et chimiques. On peut incorporer au moulage des pièces rapportées ou des accessoires. La couleur et le fini supérieurs contribuent à réduire le coût de finition de la pièce. Les opérations ultérieures d'usinage et d'ébarbure sont minimisées.

Moulage par transfert
Ressemble au moulage par compression, sauf que la charge de composé de moulage en feuille ou en vrac est chauffée dans une chambre séparée, puis transférée sous chaleur et pression dans un moule fermé où la forme de la pièce se décide et où a lieu la réaction finale de réticulation. On utilise ce procédé pour de petites pièces compliquées qu'il serait difficile de mouler suivant le procédé classique de moulage par compression.

Moulage par injection



MOULAGE DES THERMOPLASTIQUES PAR INJECTION

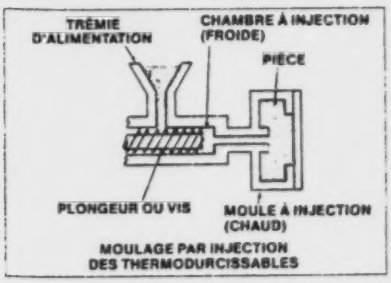
C'est parmi tous les procédés pour plastiques renforcés Fiberglas la méthode à plus fort volume; elle utilise des moules à cavité simple ou multiple pour produire de très gros volumes de pièces complexes, à des taux de production très élevés. La gamme étendue des résines thermoplastiques disponibles offre une diversité de propriétés mécaniques, chimiques, électriques et thermiques.

Description du procédé
Le composé de moulage – sous forme de granules, de concentré, ou de mélange sec – est chauffé dans la chambre à injection de la machine de moulage. Le matériau est ensuite injecté soit par plongeur soit par vis à mouvement alternatif, sous une forte pression sous forme chaude et fluide, dans un moule fermé relativement froid. Après un bref cycle de refroidissement généralement de 15 à 90 secondes, le composé est suffisamment solidifié pour permettre de retirer la pièce du moule sans distorsion. On moule de cette façon une grande variété de pièces petites à moyennes: pièces d'appareils ménagers, engrenages, carters de pompes, corps de valves; et de grosses pièces commes des cuves à lessive, des tableaux de bord d'automobiles, des doublures d'ailes et autres éléments qui exigent une stabilité dimensionnelle élevée et une complexité de dessin.

Systèmes de résines
Tous les thermoplastiques – surtout nylon, acétal, vinyle, polycarbonate, polyéthylène, polystyrène, polypropylène, polysulfone, oxyde de polyphénylène modifié, fluorocarbones, plastiques ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène) et SAN (styrène-acrylonitrile). On peut également mouler par injection certains thermodurcissables (voir page 27).

Moules
Moules en acier durci à outils, à cavité simple ou multiple.

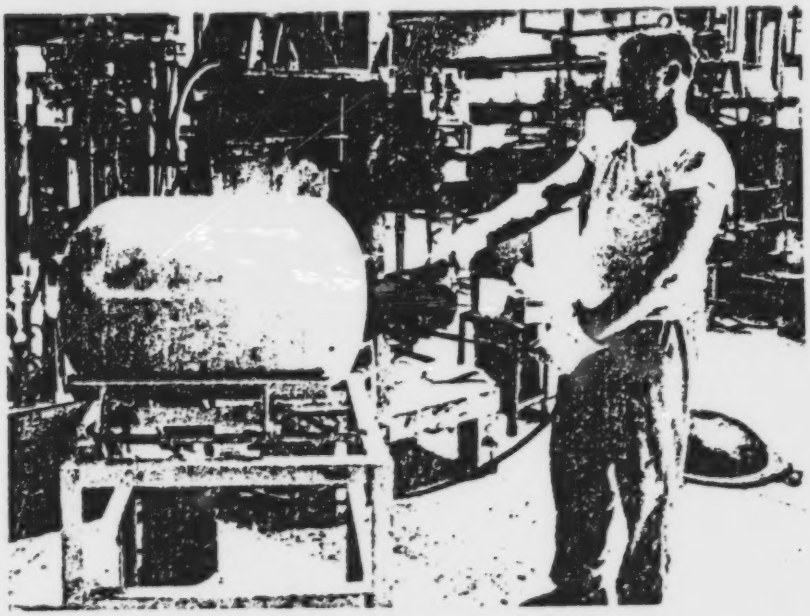
Principaux avantages
C'est la méthode de moulage qui offre le plus grand volume et la plus grande uniformité de pièces. Le procédé est généralement très automatisé. On peut obtenir grandes précision et souplesse de dessin. Les pièces vont de très petites à assez grandes, avec détail complexe, et autres caractéristiques impossibles à réaliser par d'autres procédés. Les nombreux systèmes de résines et composés disponibles, ainsi que les pigments et additifs pour couleur et les nombreuses propriétés chimiques et thermiques spéciales permettent une grande diversité.



MOULAGE PAR INJECTION DES THERMODURCISSABLES

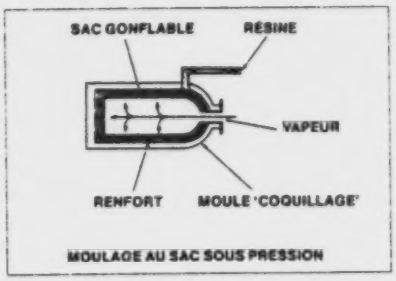
Moulage par injection des thermodurcissables:

Les composés de moulage thermodurcissables peuvent se mouler par injection lorsque la vis d'injection ou le plongeur et la chambre de la machine de moulage sont maintenus à basse température et que la température du moule est élevée de 150°C (300°F) à 160°C (325°F) plutôt que refroidie. Cela produit la prise du matériau thermodurcissable après environ une minute dans le moule chauffé et pressurisé. Le moulage par injection des résines polyesters avec des fils coupés Fiberglas jusqu'à 12 mm (½") de long présente tout un ensemble d'avantages de dessin que l'on ne trouve dans aucun autre procédé PRF. Rapidité, automatisation et faible main-d'oeuvre directe du moulage par injection se combinent avec les excellentes propriétés mécaniques d'un composé de moulage en vrac à fibres longues. Ceci se traduit par une possibilité



de volumes très élevés de pièces très complexes dont les propriétés mécaniques et la résistance aux chocs sont comparables à celles que l'on obtient par le moulage par compression ou par transfert.

Moulage au sac sou pression:



MOULAGE AU SAC SOUS PRESSION

Il convient essentiellement à la production de réservoirs en PRF sans soudure pour le traitement, la manutention et le stockage de l'eau, les réservoirs de filtrage et les réservoirs d'incendie.

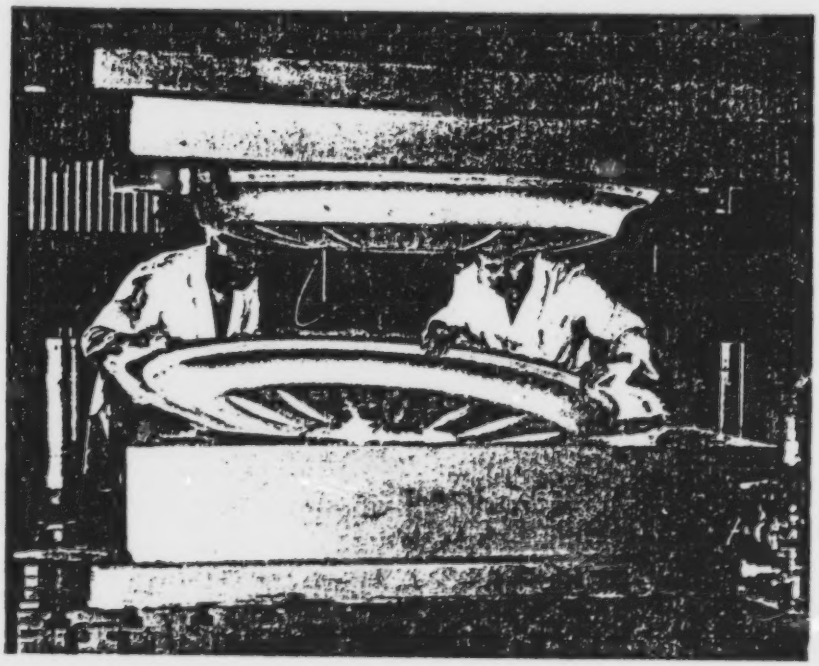
Description du procédé
Façonnage d'une préforme Fiberglas par pulvérisation, fabrication de mat ou combinaison de méthodes. On met dans la préforme un sac à compression élastique gonflable et le tout est placé dans un moule fermé froid. La résine est injectée dans le moule et le sac se gonfle jusqu'à environ .28 MPa (40 lb-po²). On applique la chaleur et la pièce prend à l'intérieur du moule. Lorsque le prise est terminée, on dégonfle le sac et on le fait sortir par une ouverture à l'une des extrémités de la pièce moulée. On retire ensuite la pièce du moule.

Moules
Moules 'coquillage' en acier, creux, avec disposition pour injection de résine. Relativement peu dispendieux pour des moules fermés en métal.

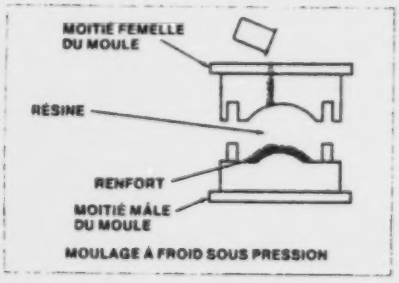
Systèmes de résines
Polyesters, tout usage et semi-rigides, résistants aux produits chimiques, à faible absorption d'humidité.

Principaux avantages
Ce procédé spécialisé produit des autoclaves d'une seule pièce, à des taux de production moyennement élevés. Ce procédé permet la fabrication de gros autoclaves. Le coût du moule est de faible à modéré. Dans ce type de procédé, on peut utiliser un stratifil de faible coût, haché en préformage. On peut incorporer la couleur au moulage. Ce procédé permet de produire des contenants transparents facilitant l'inspection visuelle de leur contenu.

Méthodes de moulage à froid:



Plusieurs méthodes de production des plastiques renforcés Fiberglas n'utilisent pas de chaleur externe pour faire prendre la pièce, le matériau ayant déjà été chauffé, ou ne nécessitant pas de chaleur pour la prise. Deux de ces méthodes combinent les meilleures propriétés des renforts Fiberglas, avec fils longs ou continus, beau fini, couleur et résistance aux produits chimiques at à l'abrasion des feuilles thermoplastiques.



MOULAGE À FROID SOUS PRESSION

Moulage à froid sous pression:

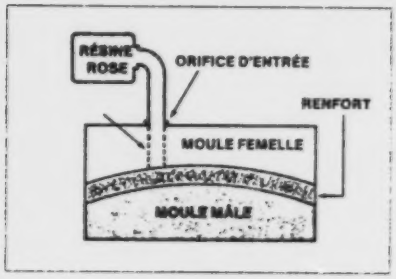
Ce procédé est une méthode économique de moulage par pression, pour la fabrication de volumes intermédiaires de produits (de 500 à 10,000), utilisant basse pression, prise à température ambiante et moules bon marché.

Description du procédé
Le renfort Fiberglas est placé entre les moules appareillés, en même temps que la résine thermodurcissable. On peut ajouter du tissu de verre pour résistance. On peut recouvrir les moules d'un gel. On ferme les moules sous une pression modérée de 14 MPa (20 lb-po^{-2}) à 35 MPa (50 lb-po^{-2}), et la pièce prend sans autre chaleur que la chaleur exothermique produite. Des pressions élevées ne sont pas nécessaires.

Moules
Moules peu dispendieux en métal, plâtre, ou plastique renforcé Fiberglas. Ces moules n'ont pas de bords en cisaille; il faut donc ébarber les pièces après moulage. Nervures, bossages et autres complexités de formes ne peuvent pas se produire facilement avec ce procédé.

Systèmes de résines
Polyesters à prise rapide à température ambiante, à faible viscosité.

Principaux avantages
Étant donné que de fortes températures et pressions de moulage ne sont pas nécessaires et que l'usinage ne coûte pas cher, ce procédé est une façon simple et bon marché de produire des pièces ayant bon aspect de surface, couleur incorporée et surfaces aux dimensions précises, avec bonnes propriétés mécaniques. Cette méthode peut être une excellente façon de produire des tirages limités de pièces pouvant être ensuite produites par une méthode à plus gros volume, comme moulage par compression avec mat ou préforme, sans changement de dessin ni de formulation des matériaux.



Moulage par injection de résine (ou moulage par transfert de résine)

Procédé de prise à température ambiante pour fabriquer des articles en quantités intermédiaires (de 500 à 10,000), avec faible pression et moules bon marché.

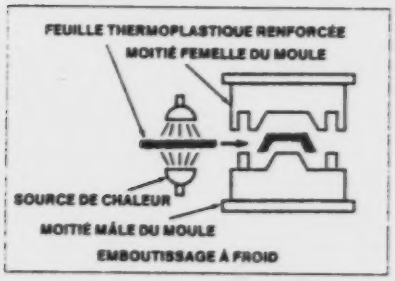
Description du procédé
On applique du renfort Fiberglas (préforme ou mat) entre les moules appareillés. On peut ajouter du tissu de verre pour résistance.

On peut recouvrir les moules de gel. On ferme et attache les moules. On injecte dans la cavité du moule la résine thermodurcissable sous pression modérée, à travers un orifice dans le moule et la pièce est prise sans autre chaleur que la chaleur exothermique produite.

Moules
Peuvent être des moules bon marché en polyester ou époxyde. Comme ils n'ont pas de bords en cisaille, il faut ébarber les pièces après le moulage. Il n'est pas facile de produire nervures, bossages et autres complexités avec ce procédé.

Systèmes de résines
Polyesters à prise rapide à température ambiante, à faible viscosité.

Principaux avantages
Étant donné que de fortes températures et pressions de moulage ne sont pas nécessaires et que l'usinage est bon marché, ce procédé est une façon simple et peu dispendieuse de produire des pièces ayant bon aspect de surface, couleur incorporée et surfaces aux dimensions précises, avec bonnes propriétés mécaniques. Cette méthode peut être une excellente façon de produire de petits tirages de pièces pouvant être ensuite produites par une méthode à plus gros volume, comme moulage par compression avec mat ou préforme, sans changement de dessin ni de formulation des matériaux.



Emboutissage à froid:

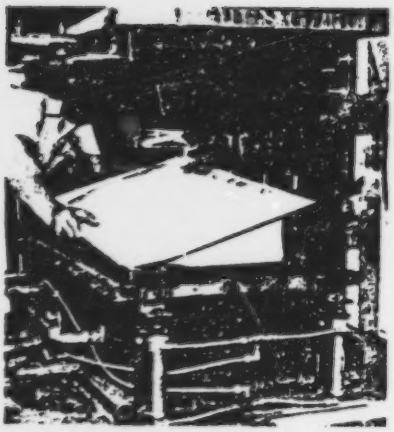
Procédé qui utilise des feuilles thermoplastiques renforcées et de l'équipement de pressage et de moulage à tôle. Il donne des taux de production de pièces satisfaisants et de bons finis de surface.

Description du procédé
On préchauffe une feuille ou "blanc" thermoplastique renforcé, et on le place dans un moule métallique monté dans une emboutisseuse à tôle. On ferme rapidement les moules pour former la pièce. On maintient les moules à la température ambiante, ou un peu au-dessus. Le cycle de refroidissement de 10 à 12 secondes exige "l'arrêt momentané" de la presse en bas de course.

Moules
Appareillés en métal. Nul besoin de chaleur, bien que le refroidissement soit nécessaire pour durées de cycle optimales.

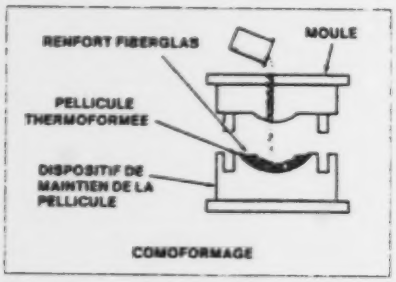
Systèmes de résines
Feuille thermoplastique, acrylique ou autre type approprié.

Principaux avantages
Ce procédé se rapproche assez de



l'emboutissage standard de tôle, largement utilisé dans les industries de l'automobile et de l'électroménager, en ce qui concerne les taux de production et les coûts de main-d'oeuvre réduits. Les pigments peuvent être incorporés au moulage; les coûts de finition peuvent être réduits; on peut mouler nervures et bossages.

Comoformage:



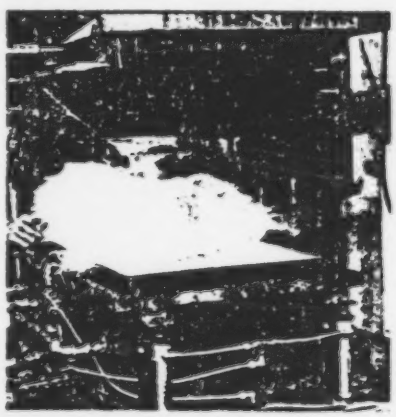
Il s'agit d'un procédé spécial qui combine les formes thermoplastiques façonnées sous vide et les laminés de plastique renforcé Fiberglas moulés à froid, pour produire des pièces ayant apparence de surface, force et résistance aux intempéries excellentes.

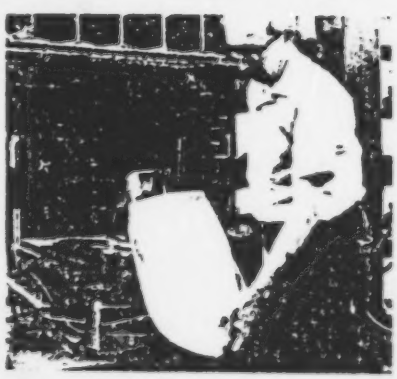
Description du procédé
On utilise un thermoformeur standard pour former une mince pellicule thermoplastique, habituellement en acrylique. On place cette pellicule dans un moule froid et on applique un laminé renforcé Fiberglas par préforme, mat ou pulvérisation par-dessus la feuille thermoformée. On ferme le moule, la pièce est prise à température ambiante chimiquement, et on la retire lorsqu'on ouvre le moule. Il existe une autre méthode qui permet au thermoformage et au moulage à froid d'être faits dans les mêmes moules et presse, produisant les mêmes types de laminé, mais avec moins d'équipement.

Moules
Appareillés en métal, plâtre ou en PRF, comme ceux utilisés pour le moulage à froid sous pression.

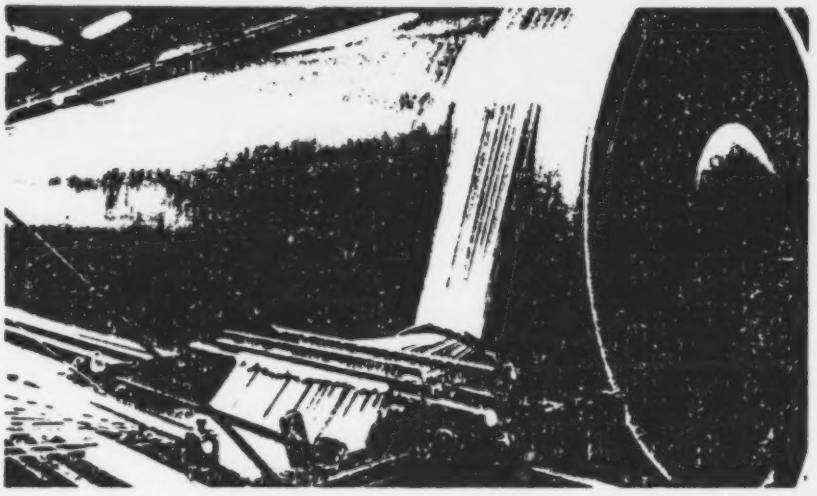
Systèmes de résines
Polyesters à prise rapide, plus feuille acrylique thermoformée.

Principaux avantages
Cette méthode produit des laminés dont les propriétés mécaniques sont excellentes, comme c'est généralement le cas pour les moulages en PRF à fibres longues. Fini de surface et apparence excellents. Bonne résistance aux intempéries grâce à la feuille thermoplastique (surtout acrylique). La pellicule thermoplastique rehausse considérablement la résistance aux chocs du composite. Ce procédé offre dimensions contrôlées, coût d'équipement bas et moules bon marché, ainsi qu'un bref délai d'exécution. Le thermoformage et le laminage peuvent se faire sur la même presse ce qui permet des durées de cycle plus courtes qu'avec le moulage à froid standard.

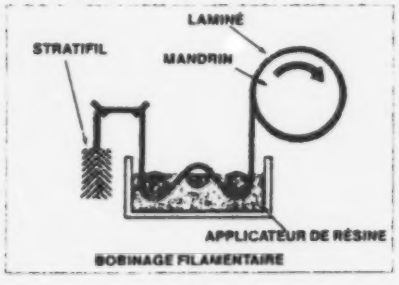




Autres importantes méthodes de moulage:



Les méthodes suivantes de production de plastiques renforcés Fiberglas sont spécialisées pour la fabrication de pièces présentant des propriétés inhabituelles, comme très grande taille, résistance très élevée, orientation de fibre très directionnelle, forme peu courante, ou profil constant. Ces méthodes de production sont les seules qui conviennent à la plupart des applications pour lesquelles elles sont conçues.



Bobinage filamentaire:

Procédé qui donne une grande orientation de fibre et un fort chargement de verre pour obtenir des résistances à la traction très élevées dans la fabrication de produits creux, généralement cylindriques, tels que réservoirs et tuyaux d'emmagasinage pour carburants ou produits chimiques, autoclaves et carters de moteurs de fusées.

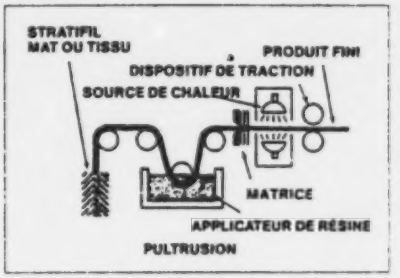
Description du procédé
On utilise un renfort de stratifil pour obtenir la meilleure résistance du laminé. Le renfort passe à travers un bain de résine et s'enroule sur un mandrin approprié (on peut également utiliser une mèche préimprégnée). Des machines à enroulement spécial disposent les stratifils en un motif prédéterminé pour donner le maximum de résistance dans le sens voulu. Lorsque suffisamment de couches ont été appliquées, le mandrin enroulé est pris à température ambiante ou dans un four. On détache alors le moulage du mandrin. De l'équipement est prévu pour pratiquer le bobinage filamentaire d'une façon continue.

Moules
Des mandrins de taille et forme convenables, acier ou aluminium, formant la surface intérieure de la pièce creuse. Certains mandrins sont conçus pour être pliants ce qui facilite le retrait de la pièce.

Systèmes de résines
Polyesters et époxydes.

Principaux avantages
Ce procédé permet d'obtenir le plus grand rapport résistance-poids de tous les procédés de fabrication des plastiques renforcés Fiberglas et assure le meilleur contrôle sur l'uniformité et l'orientation de la fibre. Les structures à bobinage filamentaire peuvent être usinées avec précision. Le procédé peut être automatisé lorsqu'un volume élevé le justifie économiquement. Le renfort utilisé est peu coûteux. Les fermetures et les raccords peuvent être enroulés dans le laminé.

Pultrusion:



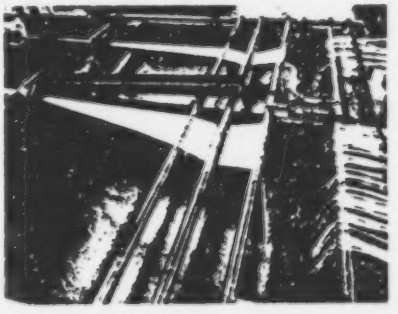
Procédé continu pour la fabrication de produits à profil constant, tels que profilés, poutres, profilés cannelés, tuyaux, canalisations, cannes à pêche.

Description du procédé
Le stratifil, mat ou tissu Fiberglas est imprégné dans un bain de résine, puis tiré à travers une matrice en acier qui établit la forme du produit et contrôle le rapport résine/verre. Une partie de la matrice est chauffée pour démarrer la prise. Avec les profilés, la prise se fait dans un four. Un dispositif de traction établit la vitesse de production.

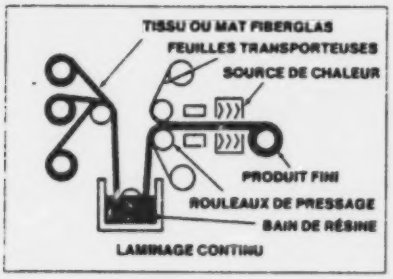
Moules
Matrices en acier trempé.

Systèmes de résines
Polyesters et époxydes, tout usage.

Principaux avantages
Le procédé est une opération continue facilement automatisable. Il s'adapte aux formes de faible dimension en coupe, et utilise du renfort bon marché. De très fortes résistances sont possibles en raison de la concentration élevée de fibre et de son orientation parallèle à la longueur du profilé étiré. Il n'y a pratiquement pas de limite à la longueur du profilé produit par pultrusion.



Laminage continu:



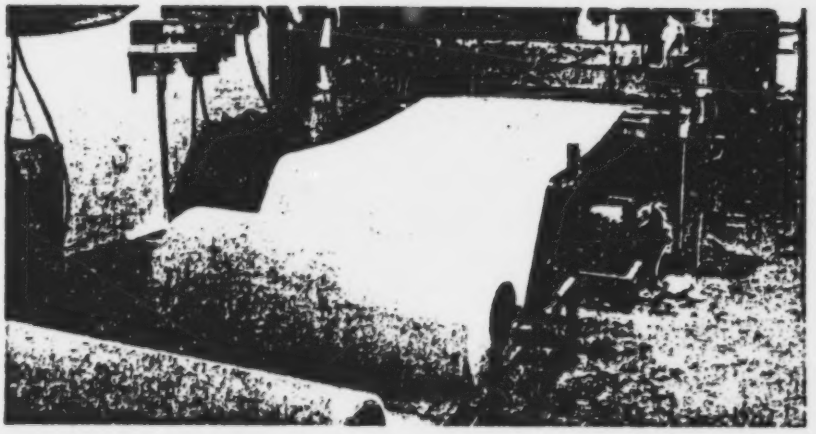
Procédé continu pour la production de formes en feuilles, comme panneaux de vitrage et matériel d'isolation électrique.

Description du procédé
Le stratifil coupé, mat ou tissu de renfort Fiberglas est mélangé à de la résine et placé en sandwich entre deux pellicules de cellophane ou autres feuilles transporteuses appropriées. Le matériau passe ensuite à travers des rouleaux pour en faire sortir l'air et déterminer l'épaisseur du laminage terminé. La prise du matériau se fait en passant dans une zone de chaleur 88°C (190°F) à 120°C (250°F). Ce procédé peut s'adapter à diverses épaisseurs de pièces et donne un bon volume de production.

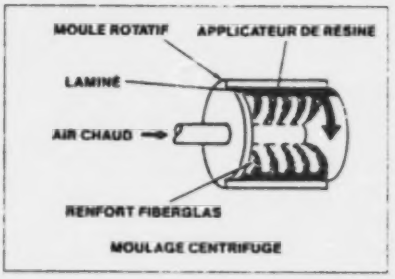
Systèmes de résines
Thermodurcissables, généralement polyesters résistant aux intempéries et retardant les flammes, ou phénoliques et mélamines pour des applications électriques. Également certains thermoplastiques, surtout les acryliques.

Moules
Rouleaux en acier qui établissent l'épaisseur et la forme du produit à mouler.

Principaux avantages
On peut atteindre des longueurs illimitées de panneaux. Le procédé peut s'automatiser. Le coût de l'usinage est très bas. On peut obtenir une grande diversité de finis et textures de surface. On peut contrôler étroitement les épaisseurs de parois. Des ondulations peuvent se faire par moules ou rouleaux spéciaux juste avant la prise.



Moulage centrifuge:



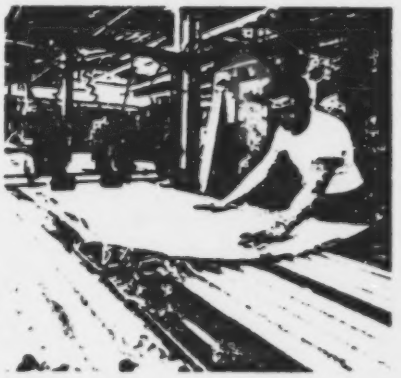
Procédé de production de formes creuses cylindriques: réservoirs d'eau, tuyaux, canalisations et récipients.

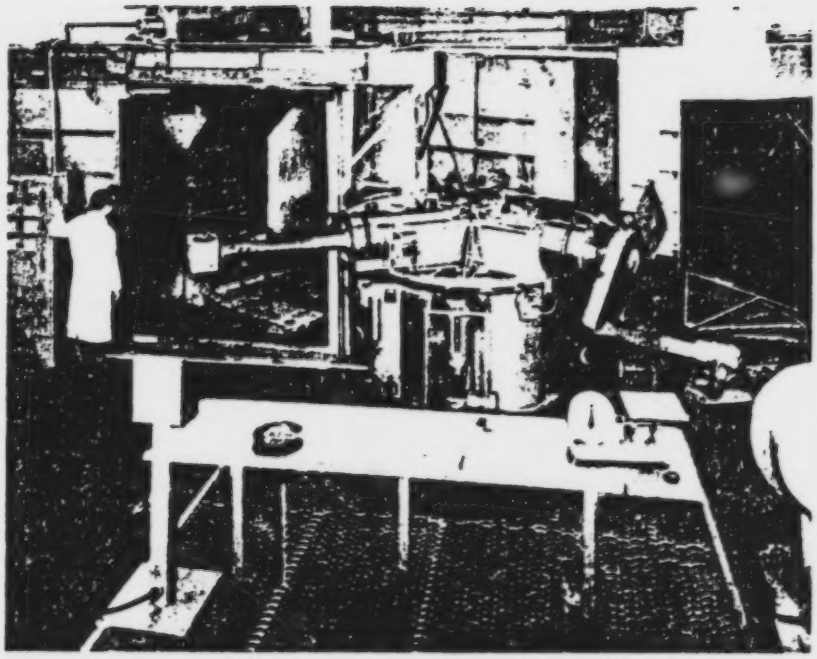
Description du procédé
On place un mat de fils coupés à l'intérieur d'un moule creux et cylindrique; ou bien on hache des stratifils et on les dirige sur les parois intérieures du moule chauffé de 82°C (180°F) à 94°C (200°F) en rotation. On applique de la résine à l'intérieur du mandrin rotatif et la force centrifuge distribue la résine, imprégnant ainsi complètement le renfort. Pour accélérer la prise, on souffle de l'air chaud au travers du moule rotatif. On arrête le moule et on retire la pièce.

Systèmes de résines
Polyesters tout usage, résistant aux produits chimiques.

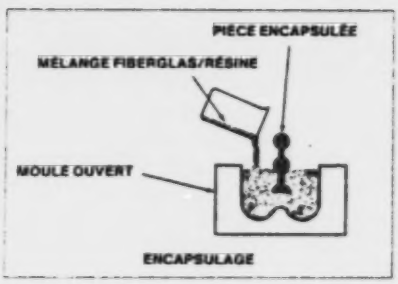
Moules
Tubes cylindriques en métal.

Principaux avantages
La méthode peut s'automatiser pour produire de gros volumes de tuyaux ou réservoirs à un faible coût d'usinage. Bonnes surfaces produites à l'intérieur comme à l'extérieur. Faible gaspillage de matériau et on obtient des laminés uniformes et sans vide. On peut incorporer au moulage des filets externes.





Encapsulage:



Methode simple pour l'encastrement de pièces électroniques ou électriques (comme bobines, transformateurs, raccords) dans une capsule protectrice en PRF.

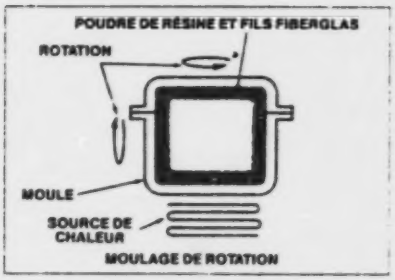
Description du procédé
On mélange des fibres broyées ou de courts fils coupés Fiberglas à de la résine catalysée et on verse le mélange dans de petits moules ouverts pour couler des connexions souples, des gaines électriques et autres pièces semblables. Les fibres diminuent le rétrécissement et le fendillement et augmentent la gamme de températures utiles du système de résine. La prise peut se faire à température ambiante.

Systèmes de résines
Polyesters, époxydes et silicones à faible exothermie.

Moules
Simples moules ouverts en caoutchouc, plâtre, bois ou PRF.

Principaux avantages
Procédé extrêmement simple qui se prête aux forts volumes et à l'automatisation à un coût très bas. On peut encapsuler des pièces rapportées de toutes tailles et formes et en n'importe quelle quantité. Le gaspillage de matériau est éliminé ou minime.

Moulage par rotation:



Méthode de production de pièces creuses à formes irrégulières, comme réservoirs, récipients, mobilier et jouets.

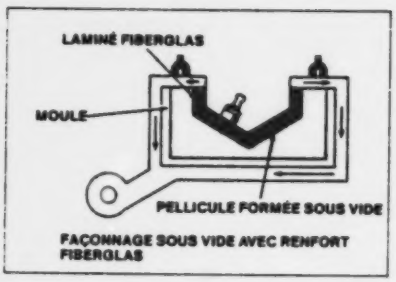
Description du procédé
On introduit une poudre thermoplastique et des fils coupés ou fibres broyées Fiberglas dans un moule creux qui est chauffé alors qu'il tourne sur deux plans. La rotation fait rouler la poudre de moulage et le renfort Fiberglas sur toute la surface intérieure du moule. Une fois que le matériau à été complètement dispersé et fondu, on refroidit le moule et la pièce terminée est retirée du moule ouvert.

Systèmes de résines
La plupart des thermoplastiques, sous forme de poudre, surtout polyéthylène, polypropylène et vinyles.

Moules
Relativement peu dispendieux, en fonte d'aluminium ou moules creux en tôle.

Principaux avantages
On peut automatiser le procédé pour produire des pièces moyennes à grosses, à de forts volumes. Aucun gaspillage de matériaux.

Façonnage sous vide renforcé Fiberglas:



FAÇONNAGE SOUS VIDE AVEC RENFORT FIBERGLAS

Le procédé consiste à façonner sous vide une feuille thermoplastique à la forme désirée, puis à appliquer une résine thermodurcissable renforcée Fiberglas à la pièce façonnée sous vide. La pièce façonnée sous vide agit comme moule pour le renfort et devient la surface apparence de la pièce terminée.

Description du procédé

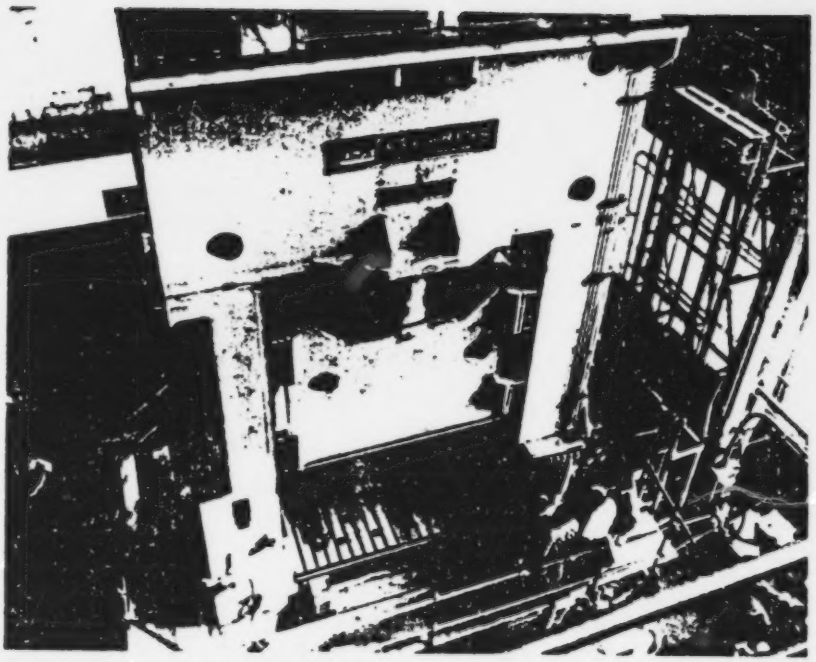
Le procédé est comparable à l'application à la main ou à la pulvérisation avec un gel, sauf que l'unité thermoplastique façonnée sous vide remplace le gel. La pulvérisation ou application à la main du thermodurcissable a lieu dans un simple dispositif de soutien.

Systèmes de résines

Polyesters tout usage, formulés pour bonne adhérence à la feuille thermoplastique et pour prise rapide à température ambiante.

Moules

Aucun moule, étant donné que la pièce façonnée sous vide agit comme moule. Il suffit d'avoir un simple dispositif de soutien pour aider la pellicule à conserver sa forme pendant que s'accomplit la pulvérisation ou application à la main. On utilise des moules classiques pour façonnage sous vide pour produire la pellicule thermoplastique.



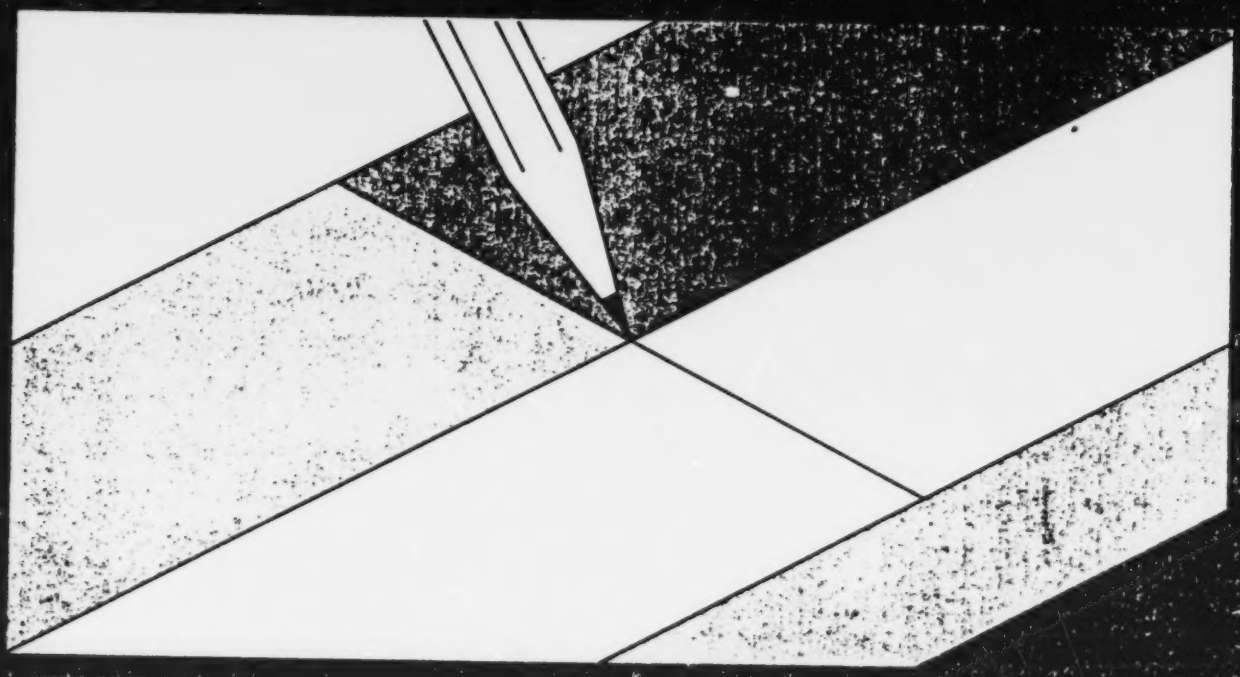
Principaux avantages

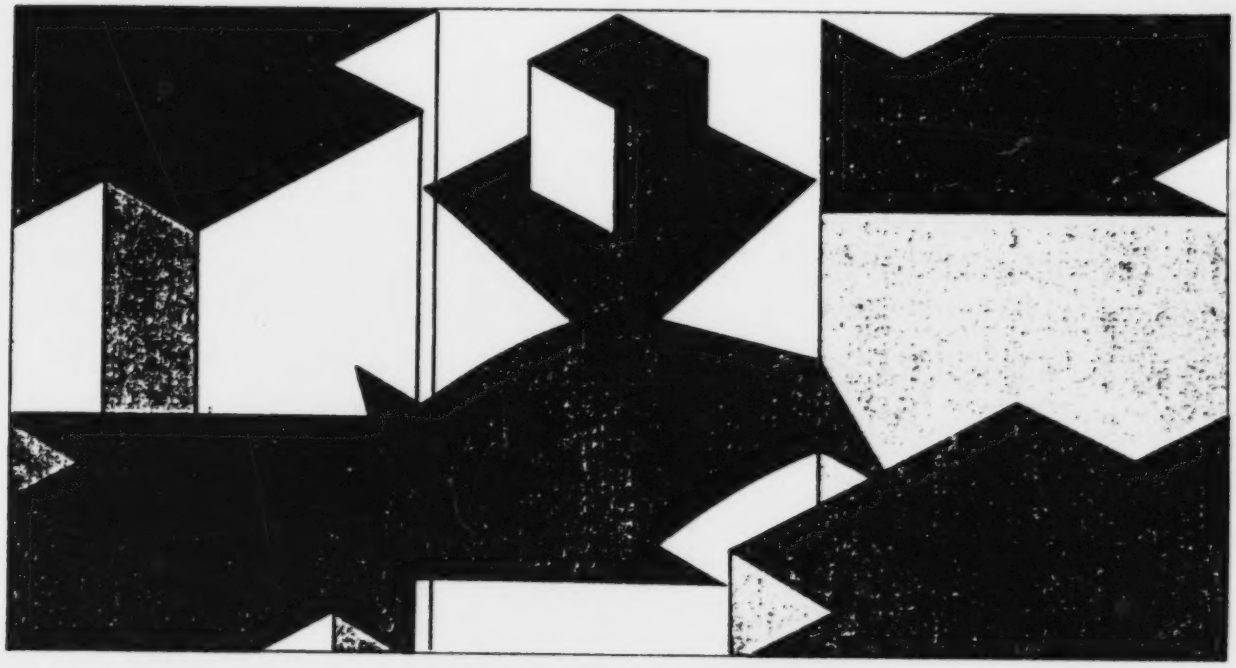
Le procédé élimine l'application du gel dans la technique de pulvérisation, et donne la possibilité d'examiner la surface extérieure de la pièce avant de procéder à l'application du laminé Fiberglas – possibilité qui bien évidemment n'existe pas avec une couche de gel. Les taux de production sont légèrement plus élevés qu'avec le gel, comblant l'intervalle de production entre les méthodes de pulvérisation et à moules fermés. Ce système convient parfaitement pour produire des éléments de salles de bain, des carrosseries de véhicules tout terrain, de petits bateaux, des housses de motoneiges, des carrosseries de remorques de camping, des coffrages à béton ainsi que beaucoup d'autres produits.

La technologie des PRF toujours en mouvement...

Répondant aux demandes d'un marché toujours plus exigeant, l'industrie des plastiques renforcés de fibres de verre est toujours en mouvement. De nouveaux systèmes de résines, de nouveaux types de renforts Fiberglas et de nouveaux procédés pour les combiner, sont continuellement mis au point. Nous avons également fait beaucoup de progrès dans l'utilisation des matériaux et procédés existants. L'automatisation réduit l'apport de matériaux ainsi que la durée et le coût de la production finale. De nouveaux équipements sont disponibles pour un contrôle plus strict des temps, températures et pressions pendant le traitement. De nouvelles presses peuvent mouler des pièces de poids et tailles jusque là impossibles – telle que la presse de 4,000 tonnes que l'on voit ci-dessus, équipée pour produire des éléments de salles de bains en plastiques renforcés Fiberglas.

Section IV





1. Calcul des exigences fonctionnelles

Il est important de déterminer dès le début les exigences fonctionnelles de l'utilisation finale. Parmi ces considérations citons:

Propriétés mécaniques – résistance à la traction, à la compression et à la flexion, à l'élongation et aux chocs, dureté, densité.

Propriétes thermiques – conductivité thermique, distorsion thermique et résistance à la chaleur, coefficient thermique d'expansion, inflammabilité.

Propriétés électriques – résistance diélectrique, résistance à l'étincelle.

Propriétés chimiques – résistance aux acides, alcalis, solvants, absorption d'eau, résistance aux radiations ultraviolettes et resistance aux intempéries.

D'autres exigences concernant la fonction peuvent inclure le fini de surface, la couleur, l'apparence, les possibilités d'usinage et des propriétés qui peuvent être désirées afin de satisfaire aux normes de l'ACNOR, du Laboratoire des assureurs du Canada ou autres autorités.

2. Calcul des exigences économiques

La seconde étape dans le processus de dessin est d'établir les objectifs de coût. En considérant la rentabilité d'une utilisation donnée, il faut adopter des "systèmes" afin que l'application PRF soit conçue dans le contexte de sa contribution *totale* à l'utilisation finale. Ceci, bien entendu, amène le dessinateur bien au-delà d'une simple comparaison de coûts de matériaux avec les PRF et d'autres matériaux candidats.

Ces considérations de "systèmes" doivent comprendre:

Le coût d'usinage, y compris l'équipement périphérique comme dispositifs de refroidissement, outils de montage.

Le coût de finition, comme sablage, polissage, placage, peinture.

Autres opérations secondaires, comme montage, usinage, etc... Il faut aussi étudier les coûts d'entreposage, d'expédition, d'emballage, de contrôle de qualité, de contrôle d'inventaire et bien d'autres coûts relatifs à l'application. Une évaluation économique aussi poussée de l'utilisation finale des PRF proposée présente trois avantages principaux.

1. Elle donne une idée juste du coût total des systèmes, permettant ainsi de prendre des décisions ultérieures de dessin beaucoup plus rentables.

2. Elle révèle des domaines possibles d'économie autres que ceux qui étaient évidents au départ, des économies qui peuvent être incorporées au produit.

3. Elle permet au spécificateur de déterminer exactement le degré de rendement qu'il désire, conformément aux prix de vente projetés ou actuels et à d'autres considérations de mise en marché.

3. Choix du matériau et du procédé

Une fois qu'il a établi les exigences fonctionnelles et économiques, le dessinateur peut maintenant choisir:

1. Le type de renfort Fiberglas qui offre les propriétés *mécaniques* dont il a besoin – proportionnellement aux facteurs économiques qu'il a envisagés.

2. La formulation de résine qui lui donne le rendement chimique, électrique et thermique requis par l'utilisation finale – conformément à ses objectifs économiques.

3. Le procédé et l'usinage qui donnent les résultats les plus rentables sur le plan économique, utilisant le renfort Fiberglas et la formulation de résine choisis, prenant en considération les contraintes de forme, taille, poids du produit, ainsi que le taux de production envisagé.

Dans la plupart des cas, le matériau et le procédé impliquent un seul choix. (Par exemple, s'il choisit le composé du moulage en feuille comme étant le matériau idéal, dans ce cas le moulage par compression est le seul procédé disponible.)

Dans certains cas toutefois, deux procédés ou davantage peuvent être disponibles même si le dessinateur a fait son choix définitif de renfort Fiberglas et de formulation de résine. (Par exemple, le composé de moulage en vrac polyester peut être moulé par compression ou par injection; la conception de la pièce et le volume de production peuvent décider du procédé à choisir.)

Dans d'autres cas, le dessinateur peut établir que deux systèmes de résines ou davantage sont capables de donner le rendement satisfaisant pour son application. (Par exemple, on peut utiliser alternativement un polyester – thermodurcissable et ABS, un thermoplastique, et le renfort Fiberglas doit être réglé pour fournir des propriétés mecaniques équivalentes.)

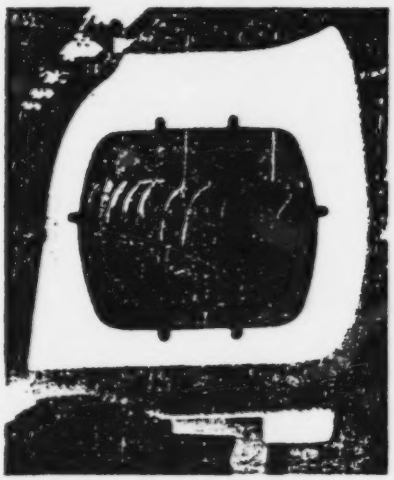
Comme toujours, le facteur déterminant est le coût/rendement. Il faut également considérer le coût du matériau, de l'usinage et de la main-d'oeuvre, et les mesurer par rapport au rendement. En continuant avec le processus de conception, l'étude de chaque méthode de production disponible révèle la méthode qui représente le meilleur choix.

Il convient de bien connaître les avantages essentiels que les plastiques renforcés Fiberglas peuvent offrir. Même si la conception initiale n'a pris pour objectif qu'un ou deux de ces avantages essentiels, des possibilités d'économie et d'amélioration du rendement dans d'autres domaines peuvent se faire jour si on les étudie encore une fois:

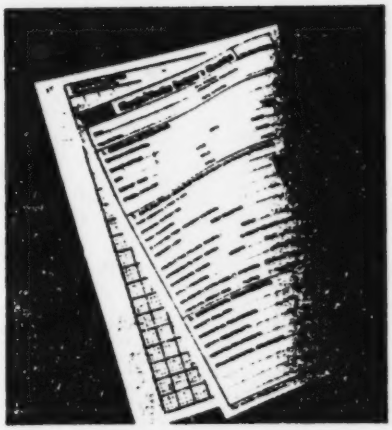
Souplesse de conception
Stabilité dimensionnelle
Consolidation des pièces
Résistance élevée
Légèreté
Résistance à la corrosion
Rendement isolant
Faible coût de finition
Coût d'usinage modéré

4. Croquis initiaux tenant compte de ces avantages essentiels

Des croquis initiaux aident les dessinateurs et les ingénieurs à mettre au point leurs concepts de base et les exigences de l'utilisation finale. En ne perdant jamais de vue les attributs fondamentaux des PRF, le dessinateur peut s'il le désire, éviter de produire une "copie" d'une pièce telle qu'elle aurait pu être conçue pour convenir aux caractéristiques de métaux ou de plastiques non renforcés. Ceci est tout particulièrement important si l'utilisation finale est une utilisation pour laquelle d'autres matériaux sont très compétitifs, et où une économie de quelques grammes de matériaux sur une grosse production peut se monter à une somme importante.



Ce boîtier de phare peut être moulé économiquement par compression avec une résine thermodurcissable renforcée Fiberglas – ou moulé par injection avec un thermoplastique renforcé Fiberglas.



C'est à ce moment qu'une fiche de contrôle, comme la "Liste de contrôle du concepteur PRF" illustrée ci-dessus, devient utile pour établir tous les critères à considérer lors du dessin initial. (On peut se procurer cette liste de contrôle chez Fiberglas Canada.)

Le dessinateur doit décider d'une méthode qui produira une pièce suffisamment résistante pour satisfaire aux exigences mécaniques, et ayant des propriétés chimiques, thermiques et électriques et une apparence qui répondent aux spécifications. Il choisit généralement entre des analyses détaillées de contraintes, ou l'utilisation d'une méthode empirique.

L'analyse de contrainte se base sur des formules techniques pour calculer les contraintes et les épaisseurs requises des pièces. On utilise les procédures d'ingénierie standards. On utilise cette méthode de dessin lorsque les exigences de rendement sont strictes et lorsque les considérations du coût des matériaux sont critiques.

Conception empirique basée sur la connaissance du matériau et du procédé dans des applications apparentées. On peut supposer l'épaisseur de la pièce, le fini de surface et autres qualités en se basant sur l'expérience et les renseignements disponibles. Un prototype fournit souvent la possibilité de tester ces suppositions avant que la pièce n'arrive au stade de l'usinage et de la production. On prépare habituellement un devis des coûts pour établir si la conception satisfait aux exigences de production.

5. Dessins détaillés des pièces

La conception en est maintenant au stade du dessin au niveau du détail. Il faut prendre en considération beaucoup de détails et les résoudre. On peut consulter des mouleurs à façon et des fournisseurs de matériaux (comme Fiberglas Canada Inc.) pour obtenir leur avis sur la conception détaillée, le fini de surface, les possibilités d'incorporer au moulage couleur, trous, pièces rapportées, nervures, bossages, emplacements de montage, utilisation de rayons. On peut envisager d'autres caractéristiques pour minimiser des points de contrainte délicats, et on peut obtenir beaucoup d'autres raffinements grâce au matériau et au procédé choisis.

6. Analyse économique et possibilités de réalisation

Lorsque les dessins détaillés sont terminés, il faut préparer une analyse économique définitive pour confirmer l'étude préliminaire, pour calculer l'investissement et le produit d'investissement et pour établir le coût total livré de l'application PRF.

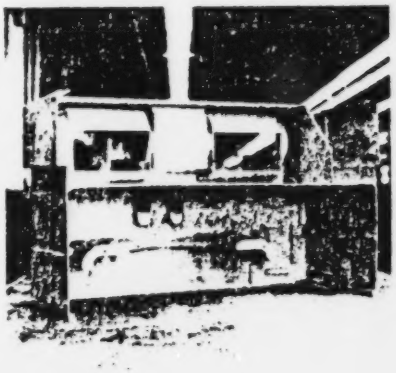
Pour établir les possibilités de réalisation technique de la conception finale, un modèle peut être très utile. Il n'est pas nécessaire que cela soit un prototype ou une réplique exacte de la pièce à mouler; une approximation des détails aide le dessinateur à se représenter la pièce PRF finie et sa relation avec des pièces auxquelles elle s'associe dans le produit fini. Elle permet aussi d'envisager des problèmes possibles dans les domaines du montage d'outils, de l'inspection et de la manutention; si l'on peut résoudre ces problèmes très tôt, cela contribue grandement à la praticabilité totale de l'application.

7. Mise au point d'un prototype

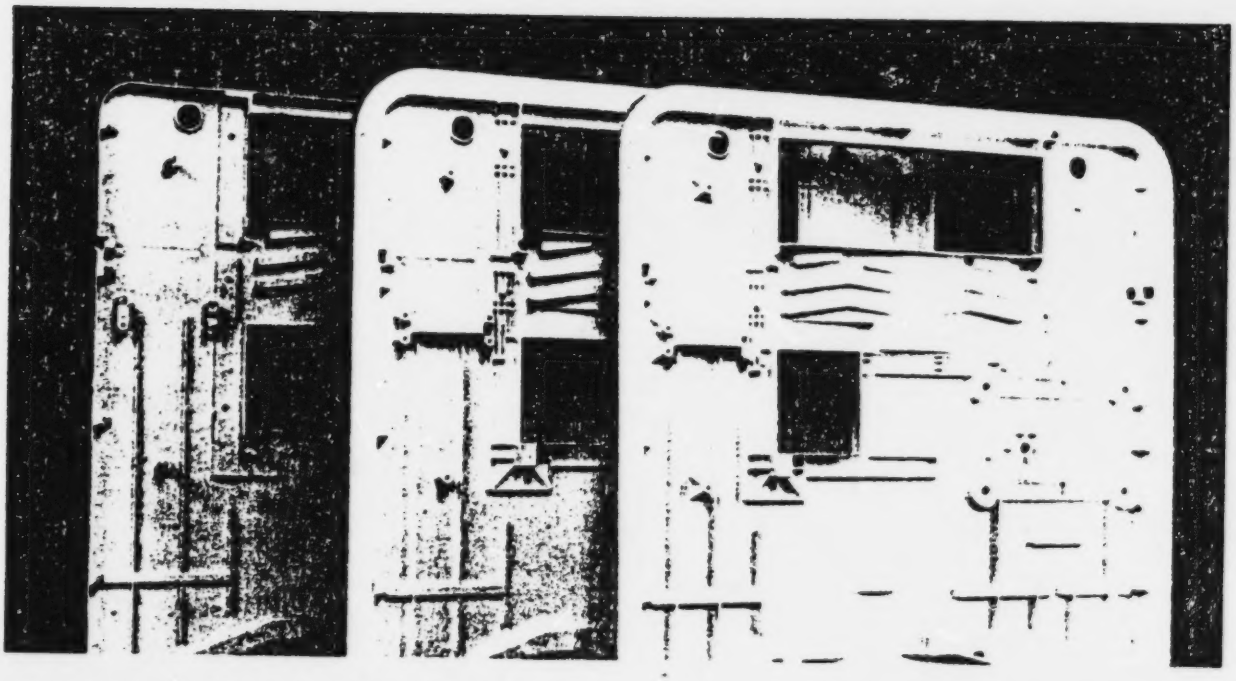
Un prototype "d'exploitation" est ce qu'il y a de mieux après le modèle. Il doit s'agir d'une réplique aussi fidèle que possible.

Le meilleur prototype est celui qui est produit à partir de moules de production partiellement terminés. Si l'application implique un procédé de moulage par contact, il est facile de fabriquer des prototypes, de les vérifier par rapport aux exigences d'utilisation finale et aux normes dimensionnelles, d'adapter ou de modifier le moule et de répéter le processus – en modifiant le moule ou les techniques – jusqu'à ce que l'on obtienne un résultat satisfaisant.

Lorsqu'on utilise des outils en acier, on peut toujours utiliser la méthode expérimentale. Dans ce cas, le principe de base consiste en l'utilisation d'outils surdimensionnés afin que, avant durcissement ou placage, il soit toujours possible d'enlever facilement du métal du moule pour former ainsi la pièce. Si le dessinateur commence avec des épaisseurs de parois minimales et un dessin relativement simple au début de la phase prototype, il est possible d'augmenter graduellement l'épaisseur de la paroi si les tests de prototype le justifient.



Les prototypes de pièces à mouler par compression sont souvent produits à la main, pour trouver rapidement les réponses aux nombreuses questions concernant le rendement chimique, thermique et structural.



On peut ajouter des renforts, des nervures et d'autres raffinements (par l'usinage d'outils semi-finis). Grâce au moulage, aux tests de prototypes et au raffinement graduel du dessin, on établit la configuration définitive. Cela donne une pièce en PRF ayant le maximum de fonction avec le minimum de matériau – proportionnellement aux objectifs de résistance, de stabilité dimensionnelle et de fini de surface du dessin.

On peut aussi faire les prototypes par la méthode d'application à la main. Bien que de tels prototypes risquent d'être assez différents de la pièce de production que le dessinateur a en vue, ils seront capables d'illustrer de nombreux aspects fonctionnels de la pièce et son montage.

8. Essai d'usinage

L'étape prototype que nous venons de décrire conduit graduellement au point où le dessin est prêt pour essai production-pilote. Au fur et à mesure que les prototypes se rapprochent des objectifs de dessin et qu'ils subissent les derniers raffinements, l'usinage est terminé. On peut maintenant appliquer le fini de surface pour faciliter le démoulage de la pièce. On peut ajouter des dispositions de chauffage ou de refroidissement. On peut construire les outils en double lorsque le volume de production l'exige.

Il est important de contrôler aussi étroitement que possible les variables, comme chaleur, pression et durées de cycle, qui se produisent lors des essais d'usinage. Cela permettra de garantir que les pièces de la production-pilote donnent les informations exactes dont le dessinateur a besoin pour les évaluer en fonction des objectifs d'utilisation. Cela contribue également à la possibilité de reproduction des pièces.

9. Préparation de la production

Il faut considérer tout le système de fabrication. Il faut arranger et organiser les presses, les moules et autre équipement afin que traitement, moulage, manutention, inspection, emballage et expédition se fassent le plus facilement possible. Il ne faut rien négliger pour obtenir le maximum du procédé et du montage afin de garantir que l'utilisation de plastiques renforcés Fiberglas apporte les plus grands avantages possibles de coût/rendement.

Trois phases pour "éprouver" un moule: versions prototype, pré-production et production finale d'un plateau d'évaporation de climatiseur, à divers stades du développement du moule. Remarquez la façon dont bossages, renforts, nervures, et autres raffinements de dessin sont ajoutés au cours de la mise au point de l'outillage. Résultat: rendement maximal, minimum de matériau – la clé de la rentabilité.

Comparaison des propriétés techniques des plastiques renforcés Fiberglas et matériaux concurrentiels

Utilisation de ce tableau

Ce tableau de propriétés donne des renseignements techniques comparatifs sur 20 composites de plastiques renforcés Fiberglas et autres matériaux couramment utilisés.

Grâce à ce tableau, l'ingénieur-dessinateur peut facilement procéder à une sélection préliminaire pour déterminer les caractéristiques de rendement auxquelles le produit fini doit répondre. Il faut considérer d'abord les propriétés les plus importantes pour l'utilisation finale; ensuite les matériaux peuvent être sélectionnés selon le rendement et la convenance du procédé.

Outre les propriétés mécaniques des plastiques renforcés Fiberglas, des plastiques non renforcés et des métaux, ce tableau offre des directives en ce qui concerne aussi la résistance chimique.

Le tableau devrait être tout particulièrement utile dans les premiers temps du dessin. Dans les derniers temps, les données spécifiques doivent être indiquées par le fournisseur du matériau, le constructeur ou le composeur – ou par des tests du système de résine et Fiberglas à utiliser.

Finalement, il faut procéder à l'analyse pour coût et rendement avant de choisir le matériau. Cette analyse doit comprendre le coût de fabrication, le coût d'outillage, les avantages de mise en marché, les investissements d'installation, la rentabilité et (ce qui est peut-être le premier point) la décision de "faire" ou "d'acheter".

Le dessinateur doit considérer le coût total y compris les avantages pour son client. Bien qu'une pièce en plastique renforcé Fiberglas coûte plus cher par livre qu'une pièce en métal ou en plastique non renforcé, le coût total peut être moindre en raison de la consolidation des pièces, d'un temps de montage réduit, d'un coût d'outillage moindre et d'un coût de finition plus bas.

	Matériau	% fibre de verre par poids	Résistance à la flexion MPa	Résistance à la flexion lb-po² x 10³	Module de flexion GPa	Module de flexion lb-po² x 10⁶	Résistance à la traction au rendement MPa	Résistance à la traction au rendement lb-po² x 10³	Module de traction GPa	Module de traction lb-po² x 10⁶	Résistance à la compression MPa	Résistance à la compression lb-po² x 10³	Allongement maximum à la traction %
Thermodurcissable renforcé de fibre de verre	Composé de moulage en feuille (CMF)	15-30	124-207	18-30	9.7-14	14-20	55-140	8-20	11-17	16-25	103-107	15-30	3-1.5
	Composé de moulage en vrac (CMV)	15-35	69-138	10-20	9.7-14	14-20	28-69	4-10	11-17	16-25	138-207	20-30	3-5
	Préforme/mat (moulé par compression)	25-50	69-276	10-40	9.0-12	13-18	125-210	25-30	6.2-14	9-20	103-207	15-30	1-2
	Polyester – moulage sous pression à froid	20-30	152-255	22-37	9.0-13	13-18	83-140	12-20	–	–	–	–	1-2
	Polyester – pulvérisation	30-50	110-193	16-28	6.9-8.3	10-12	52-125	9-18	5.5-12	8-18	103-172	15-25	1.0-1.2
	Époxyde – bobinage filamentaire	30-80	689-1860	100-270	34-48	50-70	550-1700	80-250	28-62	40-90	310-483	45-70	1.6-2.8
	Polyester – profilé	40-80	689-1240	100-180	28-41	40-60	415-1250	60-180	28-41	40-60	207-483	30-70	1.6-2.5
	Phénolique – composé de moulage	5-25	124-165	18-24	21	30	48-120	7-17	18-20	26-29	97-241	14-35	0.25-0.6
Thermoplastique renforcé de fibre de verre	Acétale	20-40	103-193	15-28	5.5-9.0	8-13	52-125	9-18	5.5-10	8-15	76-117	11-17	2
	Nylon	6-60	48-345	7-50	1.4-18	2-26	90-230	13-33	1.4-14	2-20	90-165	13-24	2-10
	Polycarbonate	20-40	117-207	17-30	5.2-10	7.5-15	83-170	12-25	5.2-12	7.5-17	97-165	14-24	2
	Polyéthylène	10-40	48-83	7-12	1.4-4.1	2.1-6	45-76	6.5-11	2.8-6.2	4-9	28-55	4-8	1.5-3.5
	Polypropylène	20-40	48-76	7-11	2.4-5.7	3.5-8.2	38-72	5.5-10.5	3.1-6.2	4.5-9	41-55	6-8	1-3
	Polystyrène	20-35	69-117	10-17	5.5-8.3	8-12	69-105	10-15	5.8-8.3	8.4-12.1	93-131	13.5-19	1.0-1.4
	Polysulfone	20-40	145-186	21-27	5.5-10	8-15	90-140	13-20	10	15	145-179	21-26	2-3
	ABS (acrylonitrile butadiène styrène)	20-40	159-179	23-26	6.3-10	9.2-15	76-110	11-16	4.1-6.9	6-10	83-152	12-22	3-3.4
	Chlorure de polyvinyle	15-35	138-172	20-25	6.2-11	9-16	79-125	14-18	6.9-12	10-18	92-116	13.4-16.8	2-4
	Oxyde de polyphénylène (modifié)	20-40	117-214	17-31	5.5-10	8-15	100-150	15-22	6.6-10	9.5-15	124-138	18-20	1.7-5
	Acrylonitrile de styrolène	20-40	103-145	15-21	5.5-12	8.0-18	52-125	13-18	6.2-13	9-18.5	83-159	12-23	1.1-1.6
	Polyester thermoplastique	20-35	131-200	19-29	6.0-10	8.7-15	79-13	14-19	9.0-11	13-15.5	110-124	16-18	1-5
Thermoplastiques non renforcés	Acétale		90-97	13-14	2.8	4	55-69	8-10	2.8-3.4	4-5	34	5	25-60
	Nylon		34-124	5-18	1.4-2.8	2-4	52	9	1.4-3.4	2-5	48-69	7-10	29
	Polycarbonate		90	13	2.1	3	52-76	9-11	2.4	3.5	83	12	100-130
	Polyéthylène (haute densité)		–	–	0.5-1.6	0.7-2.6	28	4	0.4-1.0	0.6-1.5	19-25	2.7-3.6	30-900
	Polypropylène		34-55	5-8	0.8-1.9	1.2-2.7	21-34	3-5	0.8	1.2	26-55	3.7-8	200-700
	Polystyrène (grands chocs)		21-69	3-10	0.7-3.4	1-5	21-34	3-5	1.4-2.8	2-4	28-52	4-8	15-30
	Polysulfone		10	1.5	2.8	4	69	10	2.5	3.6	79	14	50-100
	ABS (chaleur élevée)		52	8	2.1-2.8	3-4	46	6.6	1.9-2.8	2.8-4.1	47-86	6.8-12.5	10-20
	Chlorure de polyvinyle		90-110	13-16	2.8	4	41-46	6-7	2.8	4	–	–	–
	Oxyde de polyphénylène (modifié)		103	15	2.8	4	69	10	2.6	3.7	103	15	50-100
	Acrylonitrile de styrolène		67-121	9.7-17.5	3.4	5	52-76	9-11	3.4	5	97-117	14-17	2.5-3.7
Métaux	Fonte grise		69	10	N.Disp.	N.Disp.	100-210	15-30	83	120	172	25	1
	Acier à faible teneur en charbon (laminé à froid)		193	28	207	300	200-230	29-33	207	300	193	28	38-39
	Acier inoxydable		207-241	30-35	193	280	210-240	30-35	193	280	207	30	50-60
	Aluminium forgé		138	20	69	100	41-185	6-27	69	100	N.Disp.	N.Disp.	30-40
	Fonte d'aluminium		55-179	8-26	69	100	55-180	8-26	69	100	52	9	6-8
	Magnésium moulé		97	14	45	65	55-210	8-30	45	65	69-97	10-14	4-6
	Zinc moulé		N.Disp.	N.Disp.	N.Disp.	N.Disp.	69-170	10-25	N.Disp.	N.Disp.	N.Disp.	N.Disp.	10
	Laiton forgé, jaune		97	14	103	150	79	14	103	150	N.Disp.	N.Disp.	60-65

C. – Conducteur

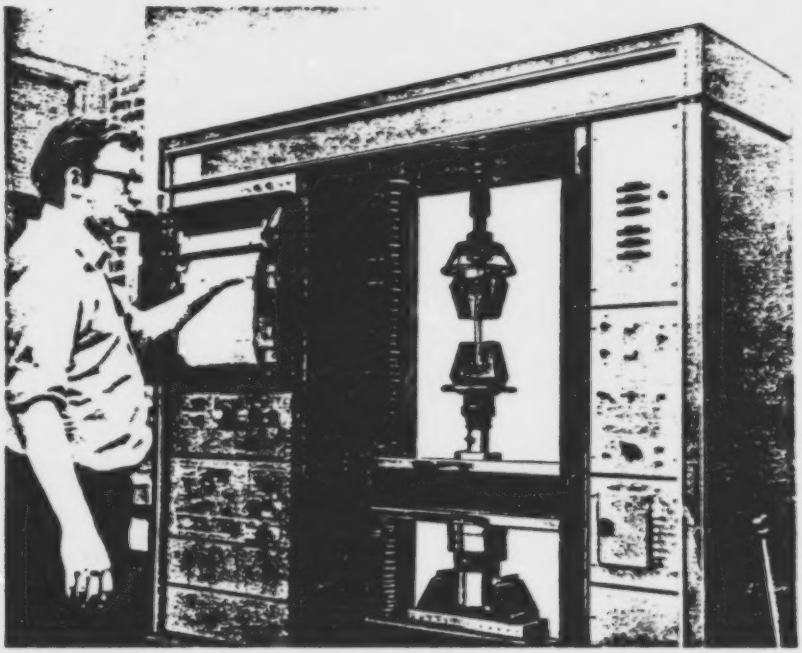
N.Disp. – Non disponible

N.Appl. – Non applicable

*Ces classifications sont les évaluations les plus élevées que l'on puisse obtenir. Des applications moins critiques peuvent permettre l'emploi de matériaux à plus basse classification U.L.

Résistance aux chocs Izod.		Conductibilité thermique		Chaleur spécifique		Classifications d'inflammabilité	Dureté	Résistance diélectrique	Poids	Densité		Distorsion thermique		Résistance continue à la chaleur		Coefficient thermique d'expansion	
J/m d'impact	pi-lb/po d'impact	W/m°C (Coef. K)	BTU/h/Pi²/°F/po (Coef. K)	J/kg°C	BTU/lb/°F	U.L.*	Rockwell	Volts/millième de pouce	spécifique	Mg/m³	lb/po³	°C à 1820 kPa	°F à 264 lb-po²	°C	°F	m/m/°C x 10⁻⁶	po/po/°F x 10⁻⁶
427-1170	8-22	0.19-0.25	1.3-1.7	1300-1500	.30-.35	94V	H50-H112	300-450	1.7-2.1	1.7-2.1	.061-.075	200-260	400-500	150-210	300-400	4-7	8-12
106-534	2-10	0.19-0.25	1.3-1.7	1300-1500	.30-.35	94V	H80-H112	300-450	1.8-2.1	1.8-2.1	.065-.075	200-260	400-500	150-210	300-400	4-7	8-12
534-1070	10-20	0.19-0.26	1.3-1.8	1300-1400	.30-.33	94V0	H40-H105	300-600	1.5-1.7	1.5-1.7	.054-.061	180-210	350-400	66-210	150-400	6-10	10-18
480-641	9-12	0.19-0.26	1.3-1.8	1300-1400	.30-.33	94V0	H40-H105	300-600	1.5-1.7	1.5-1.7	.054-.061	180-210	350-400	66-210	150-400	6-10	10-18
214-641	4-12	0.17-0.23	1.2-1.6	1300-1400	.31-.34	94V0	H40-H105	200-400	1.4-1.6	1.4-1.6	.050-.058	180-210	350-400	66-180	150-350	7-11	12-20
2140-3200	40-60	0.28-0.33	1.92-2.28	960-1000	.23-.25	94V0	M98-120	300-400	1.7-2.2	1.7-2.2	.061-.079	180-210	350-400	260	500	1-3	2-6
2400-3200	45-60	0.28-0.33	1.92-2.28	920-1000	.22-.25	94V0	H80-112	200-400	1.6-2.0	1.6-2.0	.058-.072	160-190	325-375	66-260	150-500	2-4	3-8
53-320	1-6	0.16-0.29	1.1-2.0	840-1300	.20-.30	94V0	M90-99	150-370	1.7-1.9	1.7-1.9	.061-.069	200-260	400-500	160-180	325-350	2.5-5	4.5-9
42-149	0.8-2.8	-	-	-	-	94HB	M78-M94	500-600	1.55-1.69	-	-	160-170	315-335	85-100	185-220	11-19	19-35
42-240	0.8-4.5	-	-	1300-1500	.30-.35	94V0	-	400-500	1.47-1.7	1.4	.049	150-260	300-500	150-210	300-400	6-12	11-21
80-187	1.5-3.5	-	-	-	-	94V0	M75-M100	450	1.24-1.52	-	-	140-150	285-300	140	275	7-10	12-18
64-214	1.2-4.0	-	-	-	-	94V0	-	450-500	1.16-1.28	-	-	70-94	150-200	140-150	280-300	9-15	17-27
53-214	1-4	-	-	-	-	94V0	R95-R115	500-600	1.04-1.22	-	-	110-160	230-300	150-160	300-320	9-13	16-24
21-240	0.4-4.5	-	-	960-1500	.23-.35	94V0	M70-M95	350-425	1.20-1.29	1.2-1.3	.045-.048	94-105	200-220	83-95	180-200	9-12	17-22
69-133	1.3-2.5	-	-	-	-	94V0	M85-M92	-	1.38-1.55	-	-	167-177	333-350	-	-	7-9	12-17
53-128	1-2.4	-	-	-	-	94V0	M75-M102	-	1.23-1.38	-	-	102-116	215-240	94-110	200-230	9-11	16-20
42-85	0.8-1.6	-	-	-	-	94V0	M80-M88	500-550	1.45-1.62	-	-	68-74	155-165	-	-	7	12
85-117	1.6-2.2	-	-	-	-	94V0	M95	-	1.20-1.38	-	-	104-157	220-315	120-130	240-265	6-11	10-20
21-128	0.4-2.4	-	-	-	-	94V0	M77-M103		1.22-1.40	-	-	99-110	210-230	94-100	200-220	9-12	16-21
53-144	1.0-2.7	0.19	1.3	-	-	94V0	R118-M70	550-750	1.45-1.81	-	-	193-243	380-470	140-190	275-375	3-18	24-33
64-123	1.2-2.3	-	-	1500	.35	94HB	M78-M94	465-500	1.42	1.4	.052	110-124	230-255	85-100	185-220	25	45
53-214	1-4	-	-	1700	.40	94V0	R108-118	300-470	1.12-1.14	1.1	.039-.041	49-66	120-150	120-150	250-300	31-35	55-63
854	16	-	-	1300	.30	94V0	M70	400-425	1.20	1.2	.043	130-143	265-290	140	275	22	39
32-1070	0.6-20.0	-	-	-	-	94V0	-	450-500	0.95	-	-	38-54	100-130	83-110	180-230	3	6
27-1070	0.5-20.0	-	-	-	-	94V0	R50-R110	500-600	0.9	-	-	52-60	125-140	88-120	190-240	21	38
37-192	0.7-3.6	-	-	-	-	94V0	M12-M45	300-600	1.05	1.1	.039	80-96	175-205	66-82	150-180	12-31	22-56
69	1.3	-	-	-	-	94V0	M68-R120	425	1.24	-	-	174	345	150-170	300-345	17	31
133	2.5	-	-	-	-	94V0	R113	350-530	1.05	-	-	102-118	215-245	88-110	190-230	23-29	41-52
107-1070	2-20	-	-	-	-	94V0	D30	-	1.4	-	-	68-74	155-165	-	-	-	-
80-101	1.5-1.9	-	-	-	-	94V0	M75	-	1.06	-	-	191	375	-	-	17	30
21	0.4	-	-	-	-	94V0	M80	400-500	1.08	-	-	88-104	190-220	60-96	140-205	20	36
214-235	4-4.4	41-58	288-408	540-800	.13-.19	N.Appl.	B83	C	7.19	7.2	.26	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	3	6
N.Appl.	N.Appl.	37-66	260-460	420-460	.10-.11	N.Appl.	B72	C	7.8	7.8	.28	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	3-4	6-8
454-587	8.5-11.0	14-27	98-185	500	.12	N.Appl.	B90	C	7.92	8.0	.29	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	5-6	9-10
N.Appl.	N.Appl.	117-234	810-1620	920-960	.22-.23	N.Appl.	B1-B5	C	2.8-2.8	2.8	.10	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	7	12-13
N.Appl.	N.Appl.	88-159	610-1100	920-960	.22-.23	N.Appl.	E59	C	2.57-2.96	2.5	.09	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	7	12-13
160	3	42-138	288-960	1000	.245-.25	N.Appl.	E50-E59	C	1.81	1.9	.07	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	8-9	14-16
230	4.3	110-114	764-792	420	.10	N.Appl.	B44	C	6.6	6.6	.24	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	8-9	15-16
N.Appl.	N.Appl.	116	804	380	.09	N.Appl.	F58-F84	C	8.5	8.6	.31	N.Appl.	N.Appl.	N.Disp.	N.Disp.	6-7	11-12

Assistance technique pour le moulage avec les plastiques renforcés Fiberglas:



Dans de nombreux marchés, les fabricants se tournent de plus en plus vers les PRF comme matériau technique fondamental, pour résoudre économiquement des problèmes de conception. Plus l'intérêt pour les plastiques renforcés Fiberglas grandit, plus les questions se posent.

Si vous avez décidé d'ACHETER la pièce moulée:

Où pouvons-nous faire mouler des pièces PRF?
Il existe des mouleurs à façon, compétents dans tous les procédés PRF disponibles, un peu partout au Canada. Ils sont à la disposition du dessinateur ou de l'ingénieur qui s'intéresse à ce matériau, et sont tout prêts à aider dès le début du projet en offrant assistance technique, conception de produits, outillage, prototype, choix du matériau ou du procédé. Des mouleurs très qualifiés peuvent vous aider à tirer tous les avantages des plastiques renforcés Fiberglas grâce à leur expérience très poussée dans ce domaine.

Si vous avez décidé de FAIRE la pièce moulée:

Où pouvons-nous obtenir les renseignements techniques PRF orientés vers une application particulière?
Fiberglas Canada Inc. peut vous aider ainsi que votre personnel à tirer les avantages maximums de coût/rendement de l'utilisation des plastiques renforcés Fiberglas.

Il existe de nombreuses publications sur les plastiques renforcés Fiberglas, qui donnent des détails techniques sur les nombreux aspects de la technologie PRF brièvement traités dans ce manuel.

Pour obtenir de plus amples renseignements, s'adresser à:
Fiberglas Canada Inc.
Division des textiles, renforts et produits chimiques
3080 Yonge Street, Toronto (Ontario)
M4N 3N1

MISE EN FORME DE COMPOSITES À PARTIR DE PRÉIMPRÉGNÉS

J. Dufour

Institut de génie des matériaux
Conseil national de recherches Canada
75 De Mortagne
Boucherville, Québec, Canada J4B 6Y4

En complément à la brochure "PRF Introduction aux plastiques et composites renforcés" de Fiberglas Canada Inc., nous allons traiter de la fabrication de pièces en composites à partir de pré-imprégnés (prepreg).

En premier lieu, nous traiterons des aspects généraux, ensuite nous élaborerons sur les matériaux disponibles, puis nous décrirons les différentes méthodes de moulage.

Les pré-imprégnés ou "prepregs" (contraction du nom anglais "pre-impregnated fiber) sont un matériau semi-fini constitué de la matrice et du renfort.

Les prepregs se présentent généralement en ruban mince pouvant avoir entre 25 et 1200 mm de largeur selon les besoins et sont constitués de fibres unidirectionnelles ou croisées.

LES FIBRES

Les fibres utilisées dans la fabrication de prepregs sont principalement le verre, le carbone et l'aramide.

L'usage très répandu de la fibre de verre est directement relié à ses qualités inhérentes, tels:

- son module élevé en tension;

- sa grande résistance à la chaleur et au feu;

- son excellente résistance aux produits chimiques et aux micro-organismes;

- sa résistance à l'humidité.

Il existe quatre principaux types de verre soit: A, C, E et S, E étant le plus utilisé principalement à cause de sa meilleure résistance à l'eau à long terme, son module élevé et sa constante diélectrique faible. Le verre du type C sera préféré là où la résistance aux attaques chimiques est importante.

Le tableau de la page suitante illustre les principales propriétés des différents types de verre.

Les fibres de carbone sont fabriquées à partir d'un précurseur (les trois principaux étant la fibre de rayonne, le polyacrylonitrile et le bitume (pitch) qui est traité à des températures très élevées dans des conditions bien contrôlées.

La différence entre les fibres de carbone et les fibres de graphite est la suivante:

- Les fibres de carbone sont fabriquées à des températures variant entre 1000 et 1500°C, contiennent environ 80 à 95% de carbone et ont un module d'élasticité de l'ordre de 200 GPa, alors que les fibres de graphite sont fabriquées à des températures supérieures à 1800°C, contiennent plus de 99% de carbone et ont un module d'élasticité de l'ordre de 350 GPa.

Properties of Fiberglass.

PROPERTY	GRADE OF GLASS			
	A	C	E	S
Physical Properties				
Specific gravity	2.50	2.49	2.54	2.48
Mohs hardness	—	6.5	6.5	6.5
Mechanical Properties				
Tensile strength, psi × 10^3 (MPa)				
At 72°F (22°C)	440 (3033)	440 (3033)	500 (3448)	665 (4585)
At 700°F (371°C)	—	—	380 (2620)	545 (3758)
At 1000°F (538°C)	—	—	250 (1724)	350 (2413)
Tensile modulus of elasticity at 72°F (22°C), psi × 10^6 (GPa)	—	10.0 (69.0)	10.5 (72.4)	12.4 (85.5)
Yield elongation, %	—	4.9	4.8	5.7
Elastic recovery, %	—	100	100	100
Thermal Properties				
Coefficient of thermal linear expansion, in./in./°F × 10^{-6} (m/m/°C)	4.8 (8.6)	4.0 (7.2)	2.8 (5.0)	3.1 (5.6)
Coefficient of thermal conductivity, Btu-in./hr/sq ft/°F (watt/motor °K)	—	—	72 (10.4)	—
Specific heat at 72°F (22°C)	—	0.212	0.197	0.175
Softening point, °F (°C)	1340 (727)	1380 (749)	1545 (841)	—
Electrical Properties				
Dielectric strength, V/mil	—	—	405	—
Dielectric constant at 72°F (22°C)				
At 60 Hz	—	—	5.9-6.4	5.0-5.4
At 10^6 Hz	6.9	7.0	6.3	5.1
Dissipation (power) factor at 72°F (22°C)				
At 60 Hz	—	—	0.005	0.003
At 10^6 Hz	—	—	0.002	0.003
Volume resistivity at 72°F (22°C) and 500 V DC, Ω-cm	—	—	10^{15}	10^{16}
Surface resistivity at 72°F (22°C) and 500 V DC, Ω-cm	—	—	10^{16}	10^{14}
Optical Properties				
Index of refraction	—	—	1.547	1.523
Acoustical Properties				
Velocity of sound, ft/sec (m/sec)	—	—	17,500 (5330)	19,200 (5850)

Les fibres aramides sont fabriquées à partir de la polycondensation d'un diamine et d'un diacide halogéné à basse température qui donnent un polyamide aromatique. Les deux seules fibres aramides commercialisées à ce jour sont le KEVLAR de Du Pont et le ARENKA de Enka Akzo (Hollande).

Les fibres aramides ont une force et un module relativement élevés et un alongement plus petit que les autres fibres organiques. Elles sont résistantes au feu et aux températures élevées, ainsi qu'aux solvants organiques, aux carburants et aux lubrifiants. Elles sont moins cassantes que le verre ou le graphite.

Il existe plusieurs autres types de fibre tels: le quartz, la silice, le bore qui sont utilisés pour des applications très spécialisées. Vous trouverez un tableau des propriétés des fibres les plus couramment utilisées dans les pages suivantes.

LES MATRICES

La plupart des fibres sont disponibles dans des matrices thermoplastiques ou thermodurcissables. La matrice thermodurcissable la plus utilisée est le poly-époxyde principalement à cause de la possibilité qu'il a d'être polymérisé en deux étapes. La première étape de polymérisation permet de fabriquer un prepreg légèrement collant et entreposable. Le polyépoxyde donne très peu de retrait au moulage, mais en contrepartie, le cycle de mise en oeuvre est relativement compliqué et long.

Les polyesters insaturés sont aussi utilisés pour faire des prepregs cependant, le monomer styrène est remplacé par le phtalate de diallyle (DAP) parce que le styrène est trop volatil, ce qui causerait des problèmes à l'entreposage. Ce produit, malgré sa facilité de mise en oeuvre, n'est pas très utilisé dans les composites hautes performances à cause de sa faible tenue aux températures élevées. Les vinylesters offrent un compromis intéressant entre la facilité de mise en oeuvre des polyesters et les propriétés thermiques des époxydes.

Table 1.1. Properties of the Most Commonly Used Fiber Reinforcing Agents—Metallic and Nonmetallic.

FIBER/WIRE	DENSITY (lb/cu in.)	SPECIFIC GRAVITY	MELTING POINT (°F)	MELTING POINT (°C)	TENSILE STRENGTH ULTIMATE (psi × 10^3)	TENSILE STRENGTH ULTIMATE (MPa)	TENSILE STRENGTH RATIO (in.) TO DENSITY (× 10^5)	TENSILE STRENGTH RATIO (MPa·cc/g) TO SPECIFIC GRAVITY (× 10^1)	TENSILE MODULUS OF ELASTICITY MODULUS (psi · 10^6)	TENSILE MODULUS OF ELASTICITY MODULUS (GPa)	TENSILE MODULUS OF ELASTICITY RATIO (in.) TO DENSITY (× 10^7)	TENSILE MODULUS OF ELASTICITY RATIO (GPa·cc/g) TO SPECIFIC GRAVITY
Aluminum	0.097	2.70	1220	660	90	620	9	23	10.6	73	11	27
Aluminum oxide	0.144	3.97	3780	2082	100	689	7	17	76.0	323	53	132
Aluminum silica	0.140	3.90	3300	1816	600	4130	43	106	15.0	100	11	26
Asbestos	0.090	2.50	2770	1521	200	1380	22	55	25.0	172	28	60
Beryllium	0.067	1.84	2343	1284	190	1310	28	71	44.0	303	65	165
Beryllium carbide	0.088	2.44	3500	2093	150	1030	17	42	45.0	310	51	127
Beryllium oxide	0.109	3.03	4650	2566	75	517	7	17	51.0	352	47	116
Boron	0.091	2.30	3812	2100	500	3450	55	150	64.0	441	70	192
Carbon	0.061	1.76	6700	3700	400	2760	78	157	29.0	200	57	114
Glass												
E-glass	0.092	2.54	2400	1316	500	3450	54	136	10.5	72	11	28
S-glass	0.090	2.49	3000	1650	700	4820	78	194	12.4	85	14	34
R&D target	0.090	2.49	3000	1650	1000	6890	111	277	18.0	124	20	50
Graphite	0.054	1.50	6600	3650	400	2760	74	184	50.0	345	93	230
Molybdenum	0.367	10.20	4730	2610	200	1380	5	14	52.0	358	14	35
Polyamide	0.041	1.14	480	249	120	827	29	73	0.4	2.8	1	2.5
Polyester	0.050	1.40	480	249	100	689	20	49	0.6	4.1	1	2.9
Quartz (fused silica)	0.079	2.20	3500	1927					10.0	70	13	32
Steel	0.282	7.87	2920	1621	600	4130	21	53	29.0	200	10	25
Tantalum	0.598	16.60	5425	2996	90	620	2	3.7	28.0	193	5	12
Titanium	0.170	4.72	3035	1668	280	1930	16	41	16.7	115	10	24
Tungsten	0.695	19.30	6170	3410	620	4270	9	22	58.0	400	8	21
Tungsten monocarbide	0.565	15.70	5200	2871	106	730	2	4.6	134	717	18	46

Notes: 1. Boron fiber contains a tungsten boride core.

2. Whiskers that possess both an extremely high tensile strength and an extremely high tensile modulus of elasticity are also of interest:

Aluminum oxide	Tensile strength = 1.8×10^6 psi (12.4 GPa)
Graphite	Tensile strength = 3.0×10^6 psi (20.7 GPa); tensile modulus of elasticity = 10.0×10^7 psi (6.7×10^2 GPa).
Iron	Tensile strength = 2.0×10^6 psi (13.8 GPa).

Properties of Kevlar Fibers[6,8,9]

PROPERTY	KEVLAR 29		KEVLAR 49	
	DATA FROM REF. 6	DATA FROM REF. 9	DATA FROM REF. 6	DATA FROM REFS 8,9
Specific gravity	1.44	1.44	1.44	1.45
1.5-denier fiber diameter, μm	12	11.9	12	11.9
Moisture absorption, %	3.9[a]	6.0[b]	4.6[a]	3.5[b]
Rupture tenacity, MPa (gpd)	3275 (26)	2758 (21)	3034 (24)	2758 (21)
Rupture elongation, %	3.9	4.0	2.3	2.4
Initial modulus, GPa (gpd)	69.0 (550)	62.1 (500)	124.1 (990)	131.0 (1000)
Maximum modulus, GPa (gpd)	96.5 (750)	—	137.9 (1090)	—
Bending modulus, GPa (gpd)	53.1 (410)	—	105.5 (820)	—
Calculated axial compression modulus, GPa (gpd)	40.7 (320)	—	75.8 (600)	—
Dynamic modulus, GPa (gpd)	96.5 (740)	—	137.9 (1050)	—
Knot strength, % tensile strength	—	—	—	35
Flexural fatigue resistance, cycles	—	—	—	200[c]
Creep at 90% of ultimate tensile strength, cm/cm	—	—	—	0.0011 (0)[d]
Coefficient of friction	—	—	—	0.46 (0.41)[e]

[a] At 21°C (69.8°F) and 65% relative humidity.
[b] At 22°C (71.6°F) and 55% relative humidity.
[c] At 368 MPa over a 76.2-μm-diameter pin.
[d] Initial (and secondary) creep.
[e] Yarn/yarn (yarn/metal).

Les polyimides thermodurcissables sont utilisés dans la fabrication de composites destinés à des températures de services supérieures à 150°C. Comme les polyimides ne polymérisent pas en deux étapes on leur ajoute des résines ou des caoutchoucs liquides pour la préparation des prepregs.

Plusieurs résines thermoplastiques sont utilisées dans la fabrication de prepregs; vous trouverez à la page suivante un tableau montrant la température de transition vitreuse des polymères amorphes ainsi que la température de transition vitreuse et de fusion des polymères cristallins. Les polymères montrant le plus grand potentiel sont le PPS, le PESU et le PEEK.

MISE EN OEUVRE

Les prepregs sont mis en oeuvre selon différentes méthodes qui sont choisies en fonction de l'usage ultime de la pièce en composite.

En premier lieu, il y a le moulage sous sac, lequel a trois variantes:

- sac sous vide;
- sac sous pression;
- à l'autoclave.

La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du sac favorise la densification du laminé et la diminution de vide dans la pièce. Le principal avantage du moulage sous sac est que l'on est peu ou pas limité dans la grandeur et la forme de la pièce à mouler.

Le prepreg en ruban étroit est utilisé en enroulement filamentaire d'une façon analogue au fil de fibre de verre.

POLYMERES	SYMBOLE	TEMPERATURE DE TRANSITION VITREUSE (Tg) °C
Polystyrène cristal	PS	90
Polystyrène choc	SB	90
Poly(actylonitrile/butadiène/ styrène)	ABS	105/115
Poly(styrène/acrylonitrile)	SAN	115
Poly(méthacrylate de méthyle)	PMMA	110/135
Polycarbonate	PC	150
Polysulfone	PSU	190
Polyéthersulfone	PESU	210
Polyphénylsulfone	PPSU	250
Poly(phénylène oxyde)	PPO	210

Tableau 1 : Températures de transition vitreuse des polymères amorphes

POLYMERES	SYMBOLE	TEMPERATURE DE TRANSITION °C	
		Tg	Tf
Polyéthylène basse densité	PE bd	- 110	110/120
Polyéthylène haute densité	PE hd	- 110	130
Polypropylène	PP	- 10	168/169
Poly(chlorure de vinyle) rigide	PVC	75/105	160/170
Poly(tétrafluoroéthylène)	PTFE	123	320/340
Polyoxyméthylène(polyacétal copolymère)	POM	- 50	175
Polyamides	PA 6	50/60	218/220
	PA 6-6	49	250/260
	PA 11	30	183/187
	PA 12	55	176/180
Polyéthylènetéréphtalate	PET	73	265
Polybutylènetéréphtalate	PBT	60	225
Poly(sulfure de phénylène)	PPS	88	288
Polyétheréthercétone	PEEK	140	334

Tableau 2 : Températures de transition des polymères semi-cristallins

Le moulage par compression est utilisé pour les pièces de géométrie relativement simple mais d'épaisseur appréciable. Cette méthode donne de bons résultats avec les thermoplastiques étant donné les pressions requises au moulage due à la viscosité élevée de ces matériaux à l'état fondu.

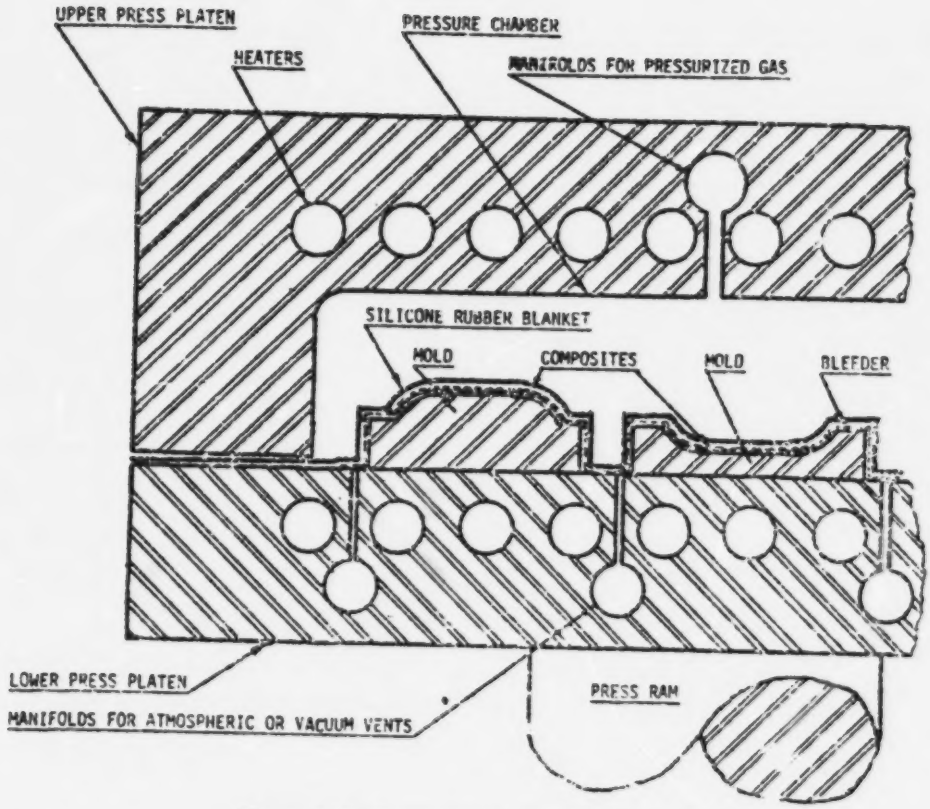


Figure 14.3. Press modification for pressure bag molding.

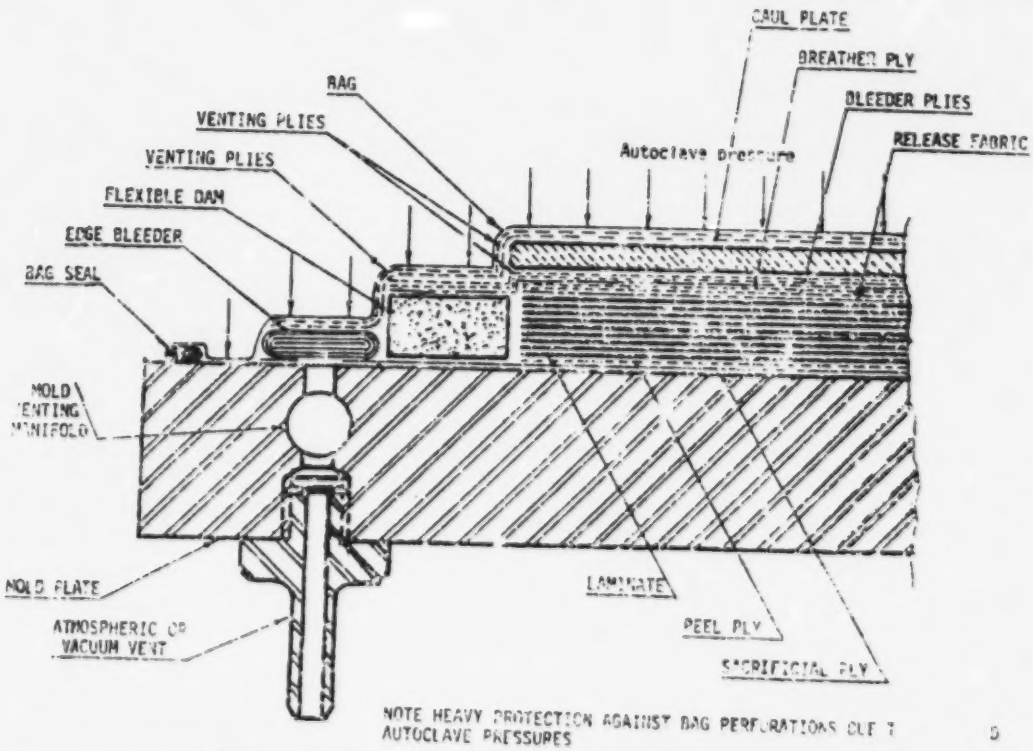


Figure 14.4. Autoclave molding method with vertical bleeder.

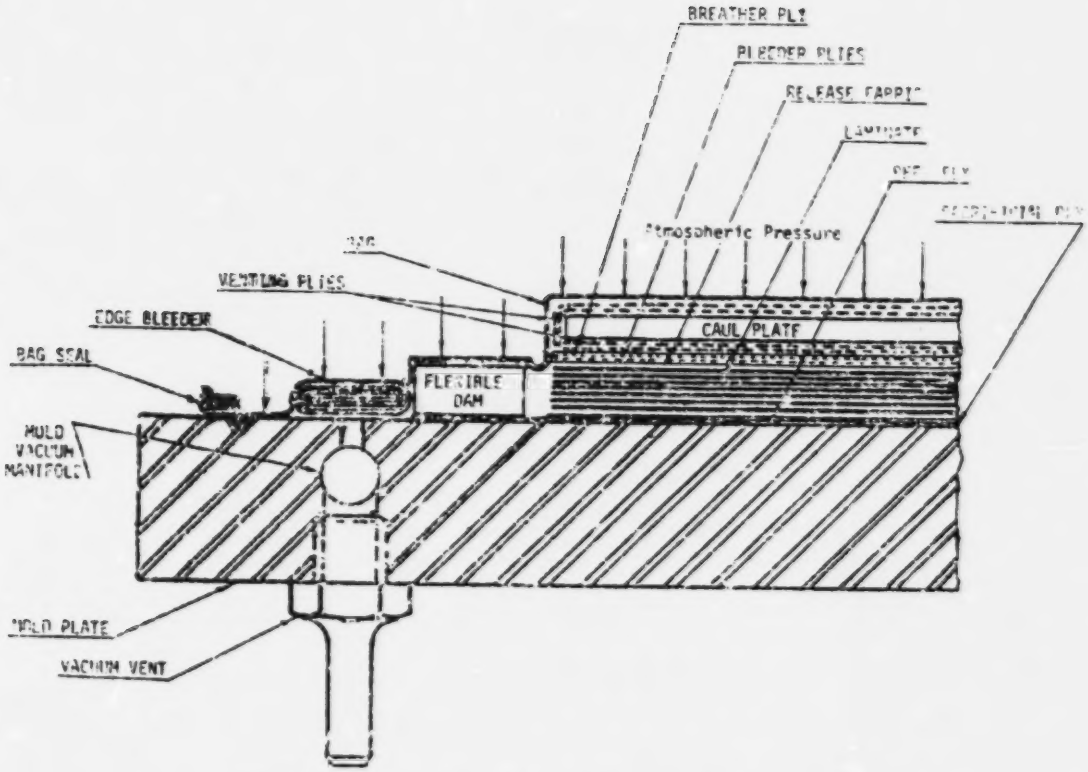
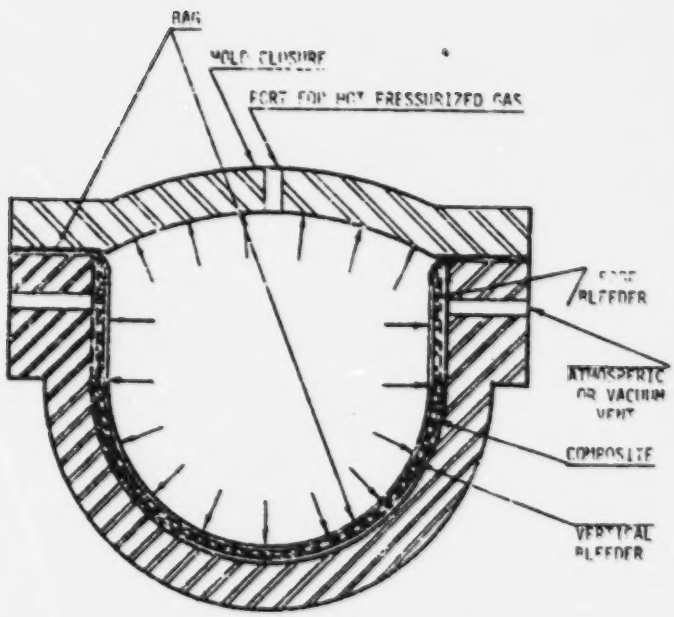


Figure 14.1. Vacuum bag molding method with vertical bleeder.



NOTE: CLAMPS ARE NOT SHOWN

Figure 14.2. Pressure bag mold.

1 - PRINCIPE

Le moulage au contact est une méthode artisanale qui consiste à imprégner manuellement le renfort de verre, sous forme de mat de fibres coupées ou de tissu, d'une matrice thermodurcissable, en général, du type résine polyester insaturée.

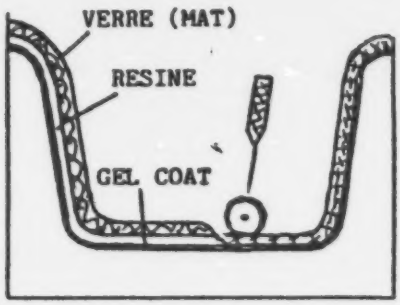
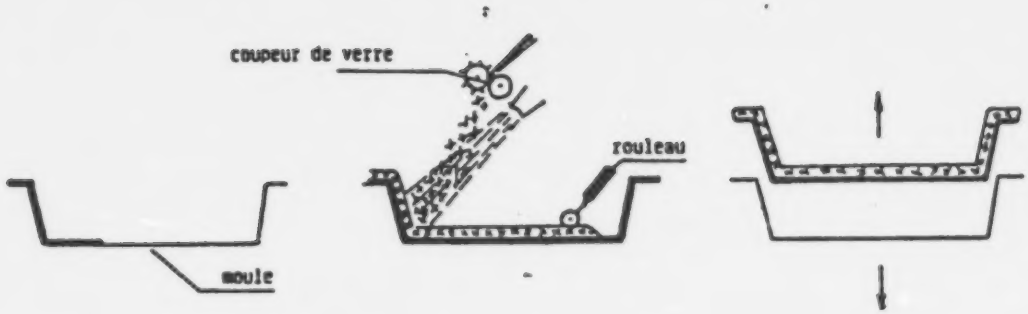


Fig. 1 : Principe du moulage au contact

3 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES ET LIMITES D'UTILISATION DU PROCÉDÉ

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Une face de très bel aspect (gel-coat) . Facilité de mise en oeuvre . Investissements très faibles (moules relativement peu onéreux) . Possibilité de réaliser des structures de grandes dimensions et de formes quelconques . Main d'oeuvre peu qualifiée	. Procédé essentiellement manuel à faibles cadences de production . Main d'oeuvre importante . Caractéristiques de la structure difficiles à contrôler (épaisseurs peu uniformes) . Une face brute



1 - Après cirage et lustrage du moule, application du gel-coat

2 - Projection simultanée de verre-résine
- Ebullage

3 - Démoulage

Fig. 1 : Le moulage par projection simultanée

4 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION

AVANTAGES	INCONVENIENTS
. Cadence plus rapide que la méthode au contact . Une face de très bel aspect (gel-coat) . Possibilité de mise en carroussel . Possibilité de réaliser des structures de grandes dimensions . Le renforcement est sous la forme la moins onéreuse (roving)	. Grande habileté du manipulateur qui conditionne la régularité de la projection et les caractéristiques mécaniques du stratifié . Peu de constance dans les épaisseurs réalisées . Difficulté de fabrication de pièces délicates . Nécessité d'avoir de nombreux moules ou un moule important pour utiliser au mieux la cadence élevée de la projection . Conditions de travail peu satisfaisantes

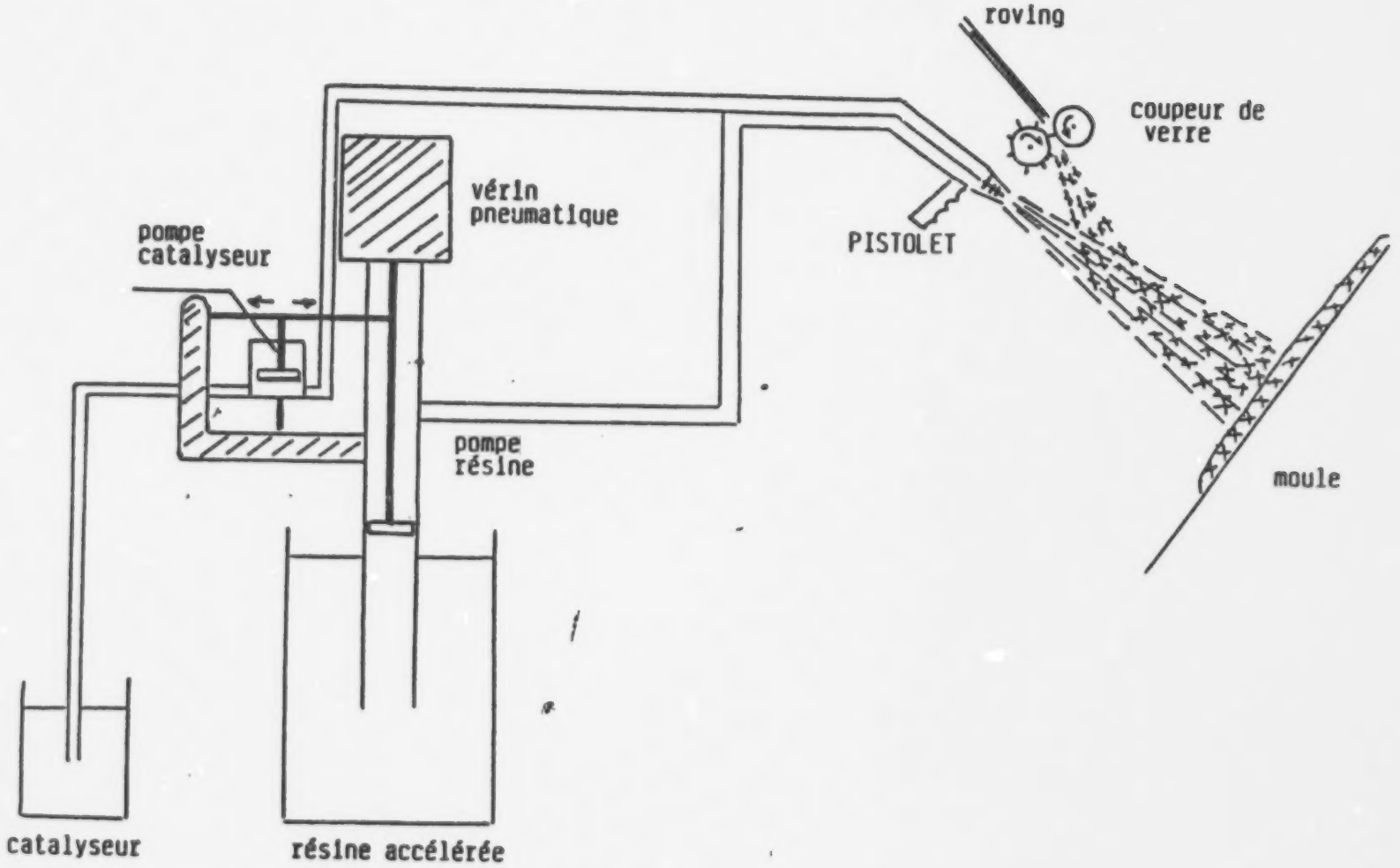


Fig. 2 : Schéma de machine à projection simultanée (type AIRLESS)

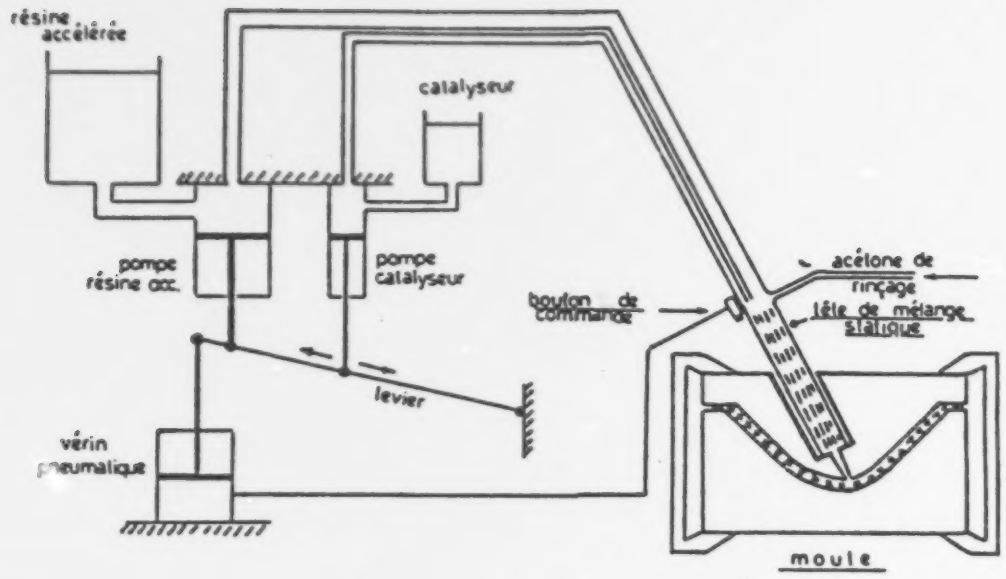


Fig. 4 : La machine d'injection

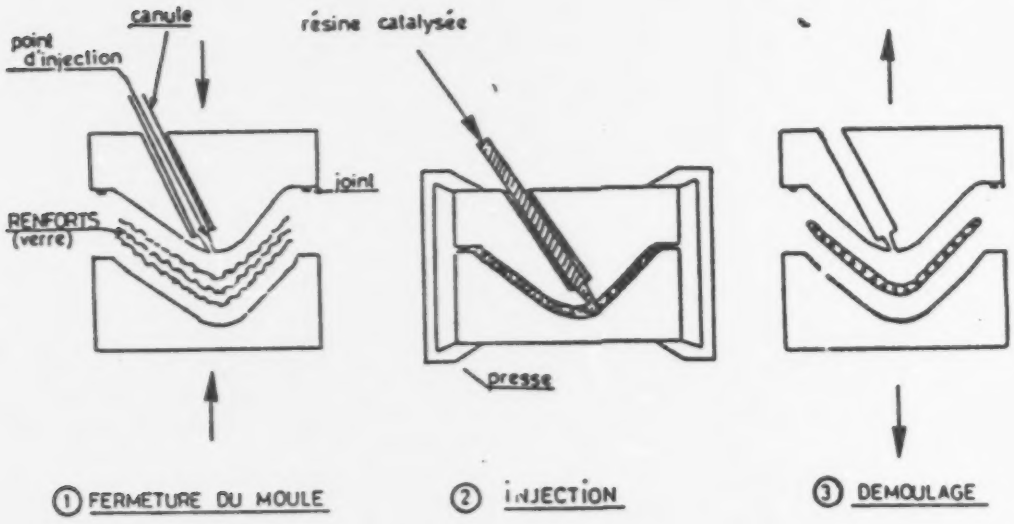


Fig. 1 : Le moulage par injection

4 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES ET LIMITES D'UTILISATION

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Pièces lisses sur les deux faces pouvant être éventuellement peintes ou revêtues de gel-coat . Formes quelconques (démoulables) . Procédé applicable au moulage de pièces dont les dimensions sont comprises entre 1 et 6 m2 . Main d'oeuvre peu importante . Problèmes d'hygiène supprimés	. Investissement relativement important (par rapport au moulage au contact ou par projection) . Taux de renfort limité (30 % avec mat à fibres continues) . Cadences de moulage moyennes avec moules en stratifié (2 à 20 pièces/moule/jour)

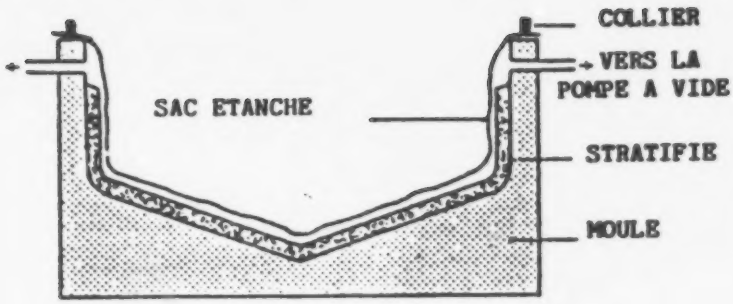


Fig. 1 : Principe du moulage au sac

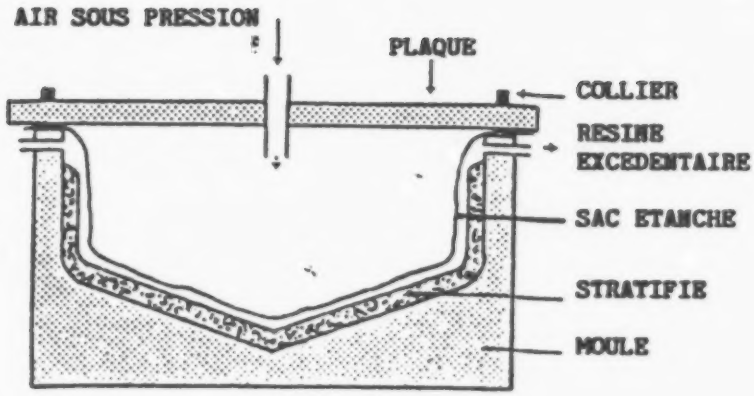
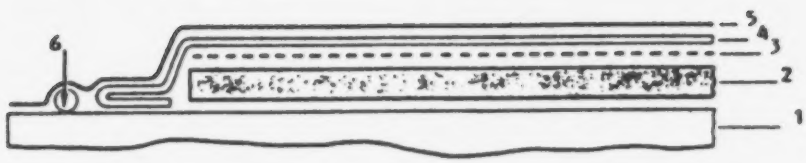
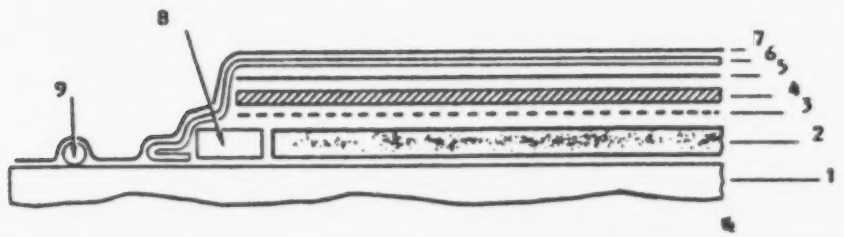


Fig. 6 : Moulage au sac sous pression



1 - Moule
2 - Prepregs
3 - Film démoulant poreux
4 - Feutre d'aspiration (verre)
5 - Poche à vide
6 - Joint de fermeture

Fig. 8 : Moulage à l'autoclave des prepregs (réf. 1)



1 - Moule
2 - Prepregs
3 - Film démoulant poreux
4 - Feutre d'aspiration
5 - Film étanche
6 - Feutre d'aspiration
7 - Poche à vide
8 - Piège à résine (mousse, feutre)
9 - Joint de fermeture

Fig. 9 : Moulage à l'autoclave des prepregs (réf. 1)

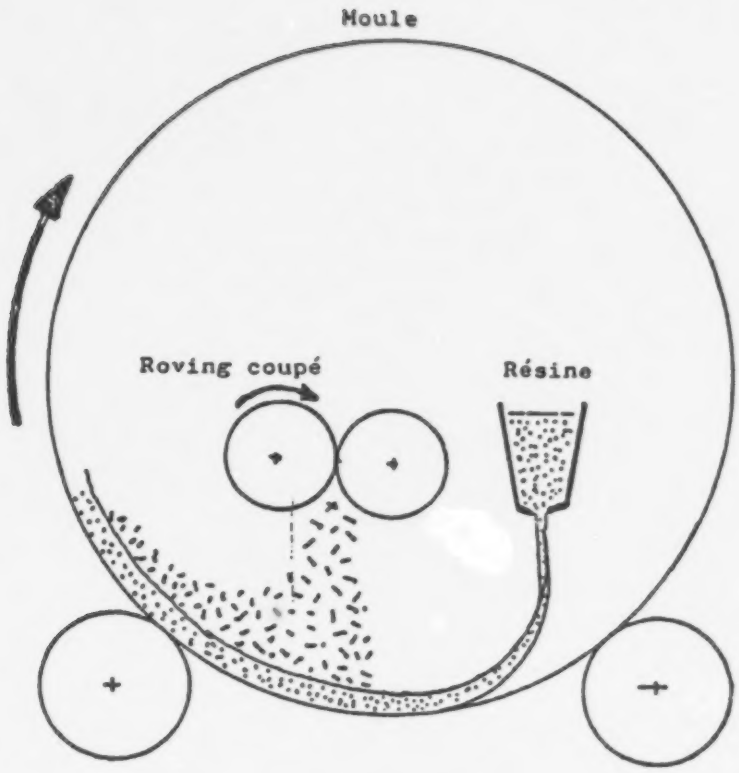
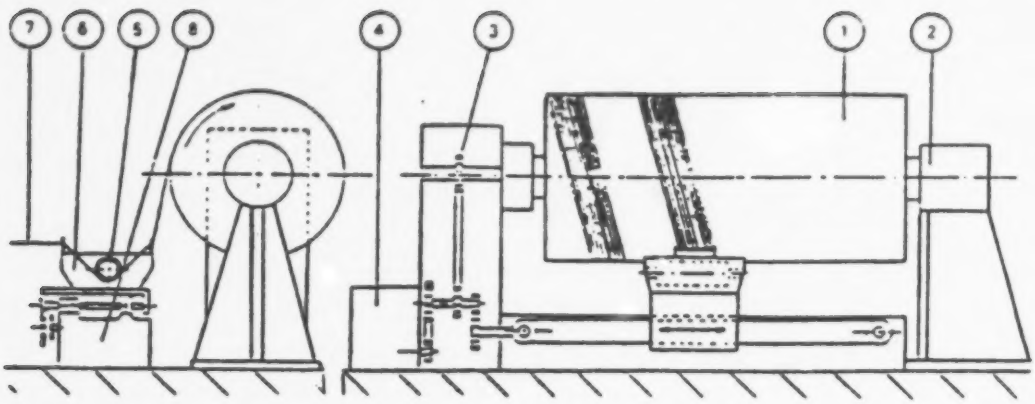


Fig. 4 : Moulage par rotation : principe (doc. Vétrotex Saint Gobain)

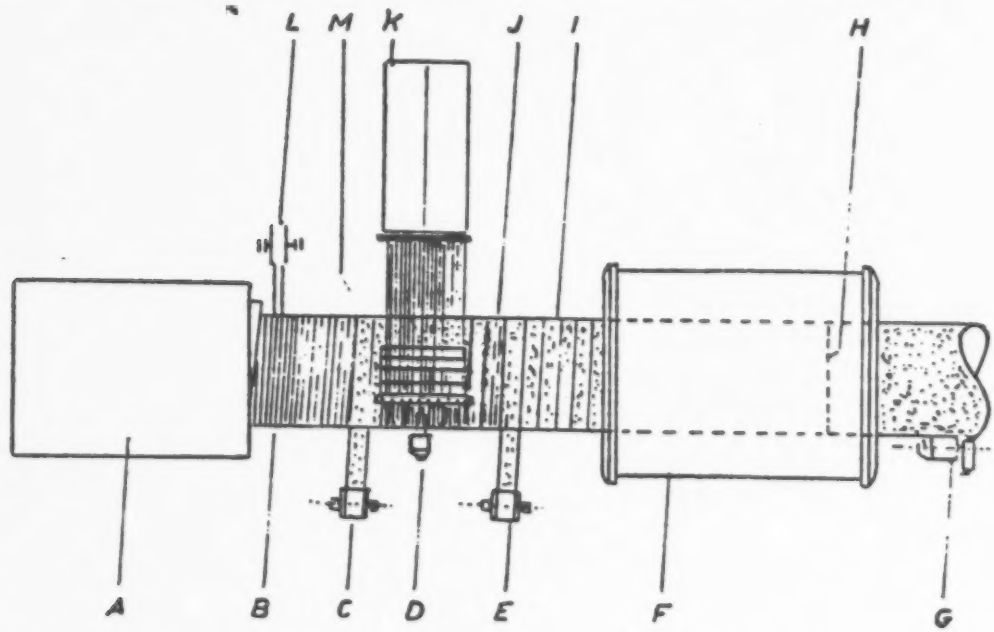
4 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Parois parfaitement étanches exemptes d'inclusions d'air . Surfaces (intérieure et extérieure) parfaitement lisses . Le retrait de la résine rend l'opération de démoulage très facile . Main d'oeuvre peu importante . Bonne reproductibilité et variations de la structure (matériaux sanwiches : bétons ou mousses)	. Contrairement au moulage par rotation des thermoplastiques, le procédé ne s'applique qu'à la fabrication de tubes ou de viroles de citernes . Possibilités d'orientation des renforts limitées . Difficulté de réaliser localement des variations d'épaisseur . Pour une même résistance, les épaisseurs sont supérieures à celles réalisées en enroulement filamentaire (utilisation de mats au lieu de rovings continus) . Investissements importants . Cadence faible



1 - Mandrin rétractable
2 - Bâti support du mandrin
3 - Commande d'entraînement du mandrin
4 - Moteur d'entraînement du mandrin et du chariot
5 - Rouleau d'étirage des rovings imprégnés
6 - Bac d'imprégnation
7 - Rovings
8 - Chariot mobile

Fig. 1 : Schéma de principe d'une machine d'enroulement pour production discontinue (doc. Vétrotex Saint Gobain) (Réf. 1)



A - Bâti et moteur d'entraînement
B - Lame d'acier de 80 mm
C - Mat de surface (voile)
D - Alimentation en résine polyester insaturée
E - Mat de surface (voile)
F - Etuve de polymérisation
G - Système de découpe
H - Extrémité du mandrin
I - Coupeur de rovings
J - Rovings de maintien
K - Cantre à rovings
L - Fils déroulant

Fig. 2 : Schéma de principe du procédé Drolsthom (doc. Drolsthom)

4.3 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCEDE PAR VOIE SECHE

AVANTAGES	INCONVENIENTS
. Manipulation aisée du prepreg . Grande facilité de bobinage . Propreté du procédé . Possibilité de réaliser des formes complexes . Vitesses de bobinage rapides entraînant des cadences de production élevées . Qualité constante . Caractéristiques mécaniques en général plus élevées que par voie humide	. Conservation des prepregs limitée . Coût de la matière première . Polymérisation à température élevée (150°C en moyenne) . Difficulté de réalisation de grandes pièces par la nécessité de disposer d'étuves appropriées . Choix des prepregs limité

4.4 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCEDE PAR VOIE HUMIDE

AVANTAGES	INCONVENIENTS
. Choix des matrices et des renforts . Possibilité de polymérisation à température ambiante dans le cas des résines polyesters insaturées . Coût peu élevé des matières premières	. Formes complexes limitées . Mise en oeuvre délicate au niveau de l'imprégnation . Vitesses de bobinage limitées liées à la rapidité d'imprégnation . Difficulté de contrôler et de faire varier le rapport verre/résine en cours de fabrication

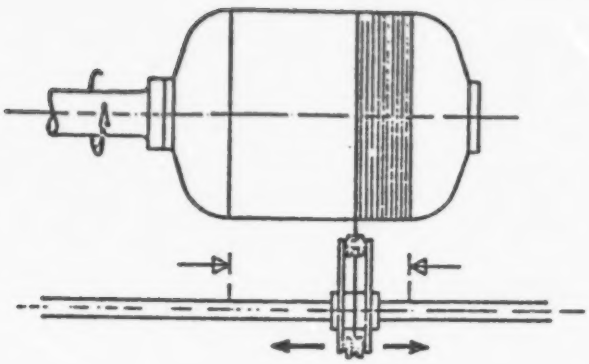


Fig. 4 : Enroulement circonférentiel (doc. Vétrotex Saint Gobain)

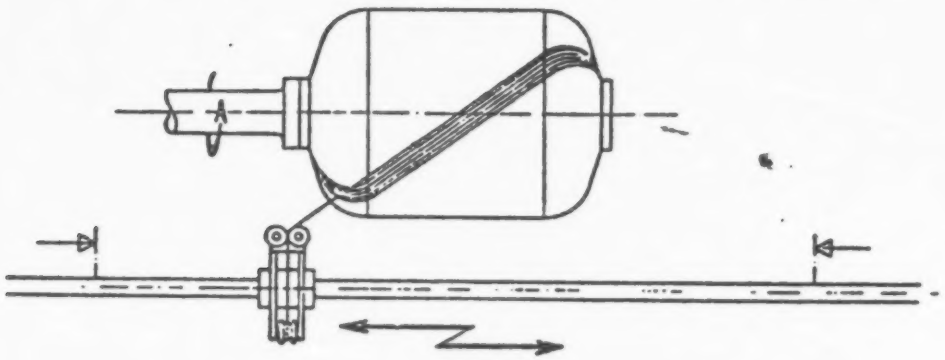


Fig. 5 : Enroulement hélicoïdal (doc. Vétrotex Saint Gobain)

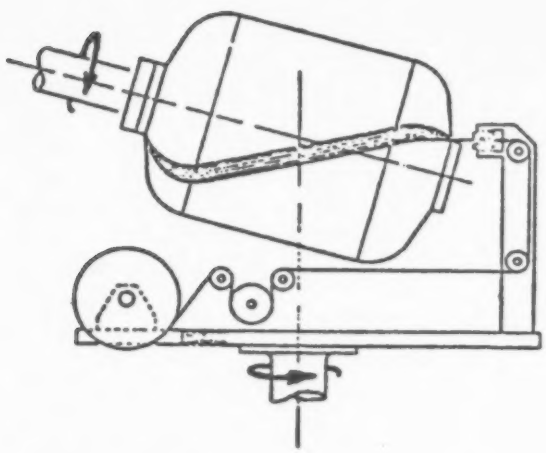


Fig. 6 : Enroulement polaire (doc. Vétrotex Saint Gobain)

7 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Caractéristiques mécaniques élevées (le meilleur rapport résistance/poids) . Orientation des renforts dans le sens préférentiel . Détermination par le calcul des caractéristiques souhaitées . Utilisation du renfort sous sa forme la moins onéreuse (roving) . Possibilité de fabrication continue . Main d'oeuvre faible	. Main d'oeuvre qualifiée . Installations coûteuses . Cadences relativement faibles

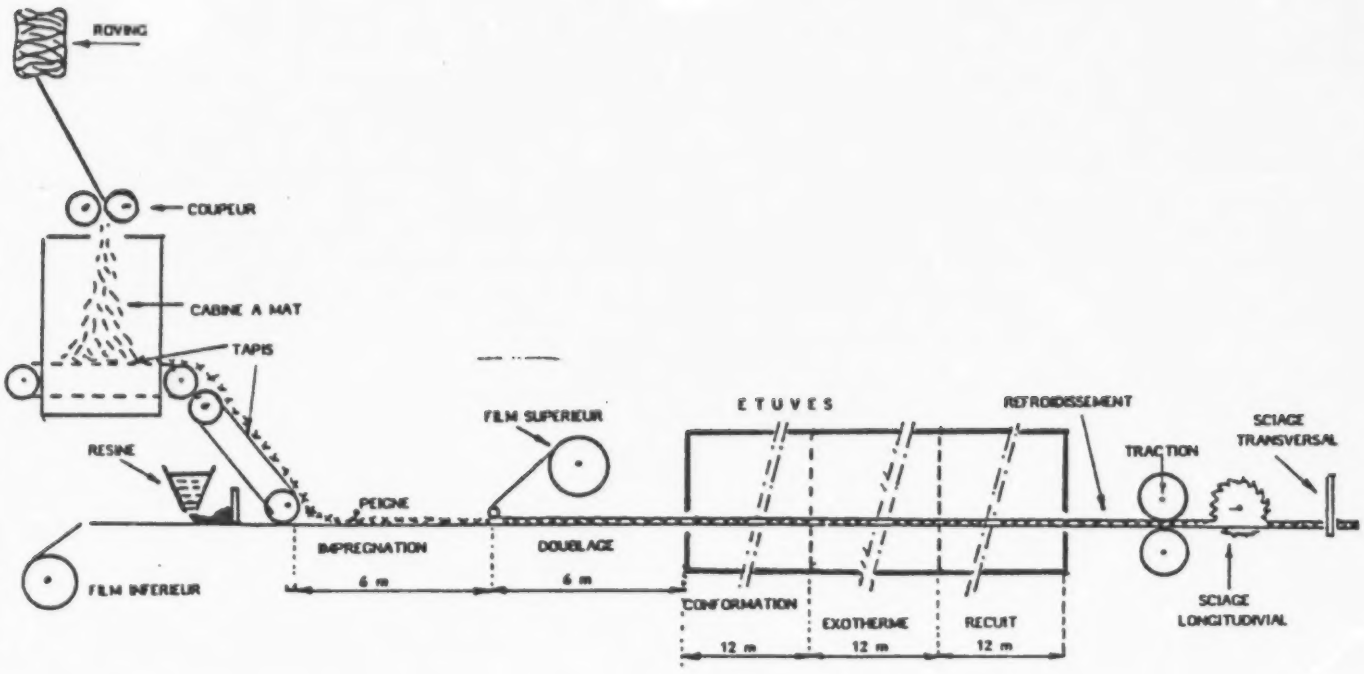


Fig. 2 : Schéma d'une machine industrielle de fabrication de plaques ondulées

4 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Production en continu . Pas de limitation en longueur . Possibilité d'ajuster les caractéristiques en jouant sur le taux de verre . Propriétés mécaniques bien définies et reproductibles . Grande variété de profilés possibles à condition d'être extrudables	. Investissements importants . Limitation dans les dimensions en section des profilés

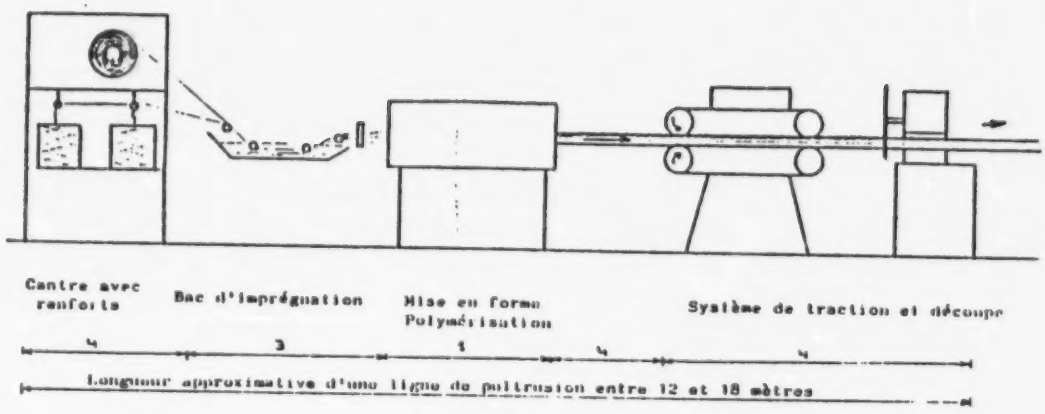


Fig. 1 : Schéma d'une installation de pultrusion (doc. Vétrotex Saint Gobain) (réf. 1)

5 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION DU PROCÉDÉ

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Pas de limitation en longueur . Production continue . Grande souplesse dans les variations de caractéristiques mécaniques en jouant sur le taux de renfort . Réalisation de formes variées et compliquées	. Investissements importants . Limitation dans les variations d'épaisseur des sections des profilés

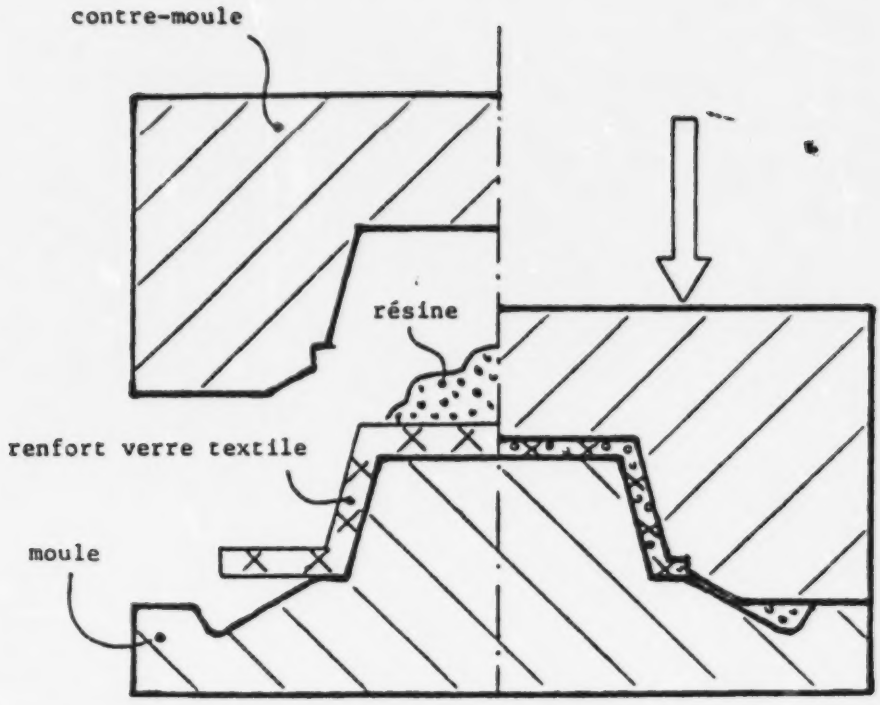


Fig. 1 : Schéma de principe de moulage à la presse basse pression à froid (doc. Vétrotex Saint Gobain)

3 - CARACTÉRISTIQUES DISTINCTIVES ET LIMITES D'UTILISATION

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Le procédé permet d'obtenir une pièce moulée sur les deux faces (faces lisses)	. Cette technique perd son intérêt si on dépose un gel-coat (cycles trop longs)
. Caractéristiques mécaniques intéressantes par la présence de mat à fils continus	. Séries moyennes (5.000 pièces/an)
. Investissements relativement peu élevés (presse basse pression et moule en composite)	. Procédé limité dans la forme des pièces à mouler
. Main d'oeuvre peu importante	. Cycles de moulages longs (5 à 10 pièces/heure) par rapport à la presse à chaud
. Procédé bien adapté à la production de petite série	. Nécessité de peindre pour obtenir une pièce de très bel aspect
	. Opération d'ébarbage indispensable
	. Perte de matière relativement importante

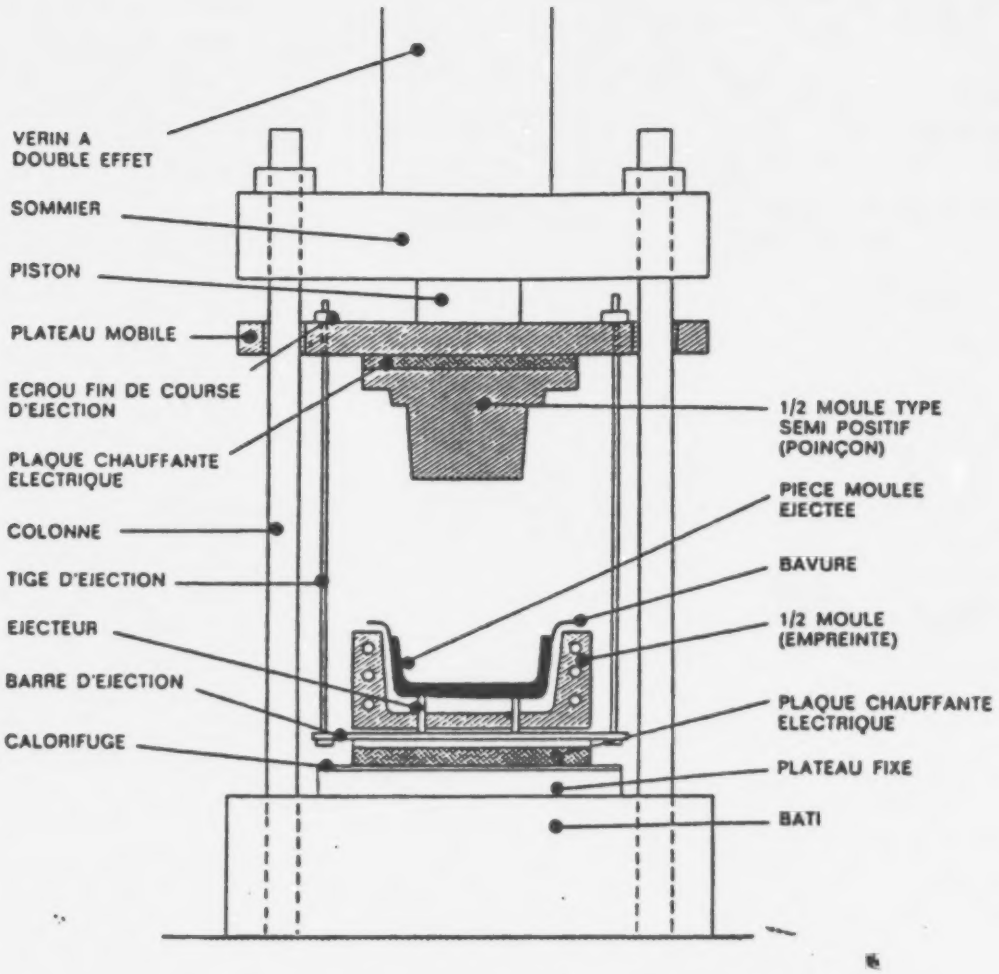


Fig. 2 : Presse de compression verticale (doc. Rhône Poulenc)

2.6 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MOULAGE PAR COMPRESSION

AVANTAGES	INCONVENIENTS
. Outillage relativement simple coût moins élevé qu'en injection . Moulage de pièces de grandes dimensions possible . Pressions de mise en oeuvre relativement peu élevées, d'où possibilité d'un plus grand nombre d'empreintes que par injection . Perte de matière plus faible (absence de carotte)	. Cycles de moulage relativement longs . Dosage préalable nécessaire pour chaque empreinte . Bavures importantes (d'où opération de finition supplémentaire) . Cotes des pièces difficiles à respecter . Pièces présentant de fortes différences d'épaisseur délicates à mouler (phénomènes de retassures)

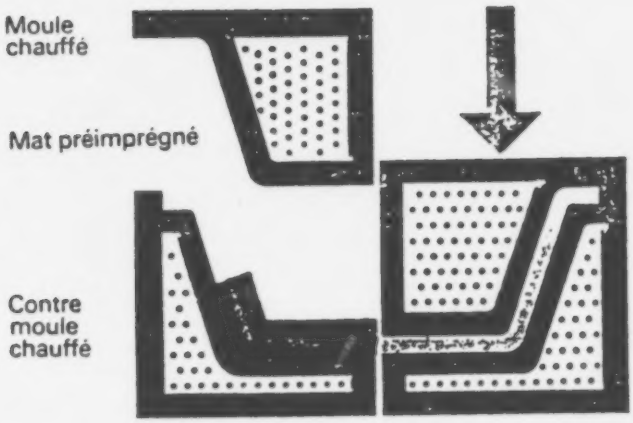


Fig. 13 : Principe du moulage du SMC (doc. Vétrotex Saint Gobain)

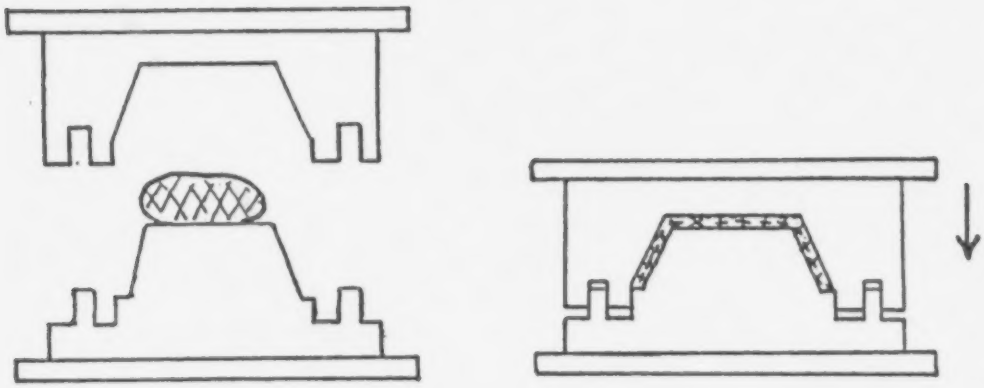


Fig. 12 : Principe du moulage par compression des coumpounds polyesters

7.5 - CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES - LIMITES D'UTILISATION DU MOULAGE SMC

CARACTERISTIQUES DISTINCTIVES	LIMITES D'UTILISATION
. Deux faces moulées lisses . Grandes cadences de production (60 à 250 pièces/moule/jour) . Main d'oeuvre faible . Possibilité de moulages compliqués (nervures, inserts) . Excellentes caractéristiques mécaniques . Procédé adapté aux séries supérieures à 5.000 pièces/an	. Procédé limité aux pièces de petites ou moyennes dimensions inférieures à 5 m2 (forces de fermeture des presses trop élevées au delà) . Investissements très importants en moules et en presse . Revêtement IMC (ou ponçage) plus traitement de peinture nécessaires pour les pièces d'aspect

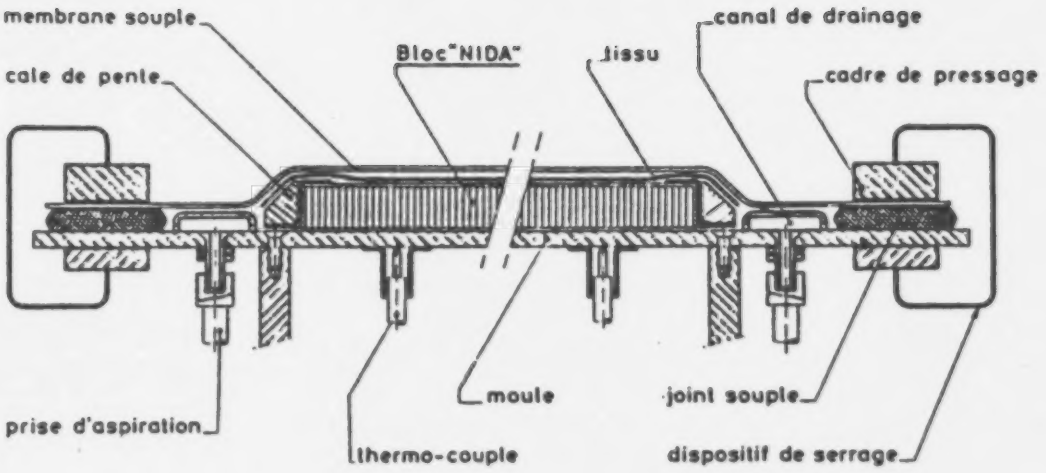


Fig. 7 : Mode d'assemblage d'un panneau avec âme en Nida à l'autoclave (réf. 1)

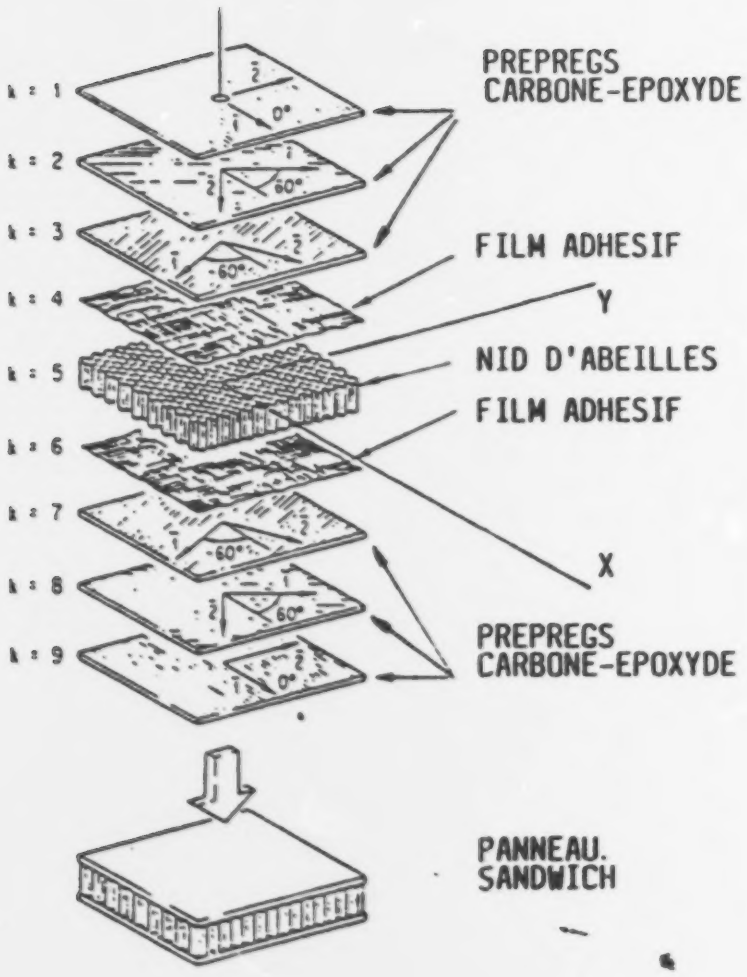


Fig. 8 : Constitution d'un panneau sandwich avec âme en "nids d'abeilles" et peaux en stratifié carbone/époxyde (réf. 2)

LE PROCÉDÉ D'EXTRUSION DES THERMOPLASTIQUES

PAR

A.M. CATANI

TABLE DES MATIÈRES

1. Historique

2. Procédé d'extrusion

   a) L'extrusion en général

   b) Choix de l'extrudeuse

3. Conception de la vis

4. Propriétés des thermoplastiques

   a) Propriétés importantes pour l'extrusion

   b) Caractéristiques générales

5. Instrumentation

6. Mise en marche de l'extrudeuse

7. Filières

   a) Tuyaux

   b) Profilés

   c) Feuilles

8. Opération - problèmes, causes et remèdes

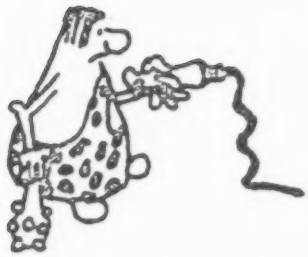
9. Contrôle de la qualité - produit

10. Sécurité

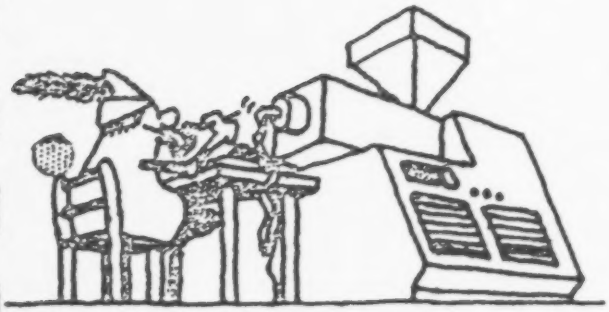
11. Lexique

HISTORIQUE

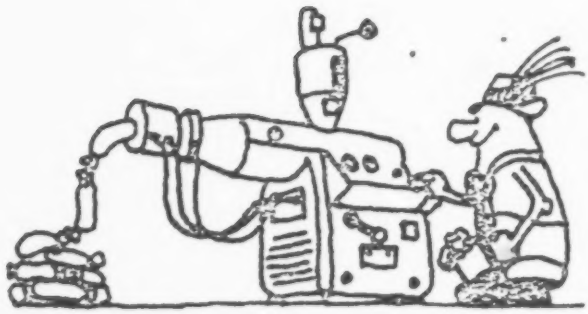
L'extrusion est une très vieille technique



... connue depuis longtemps pour la fabrication de ...

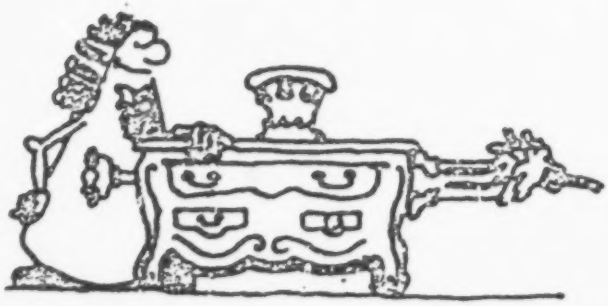


produits alimentaires (nouilles, spaghettis...



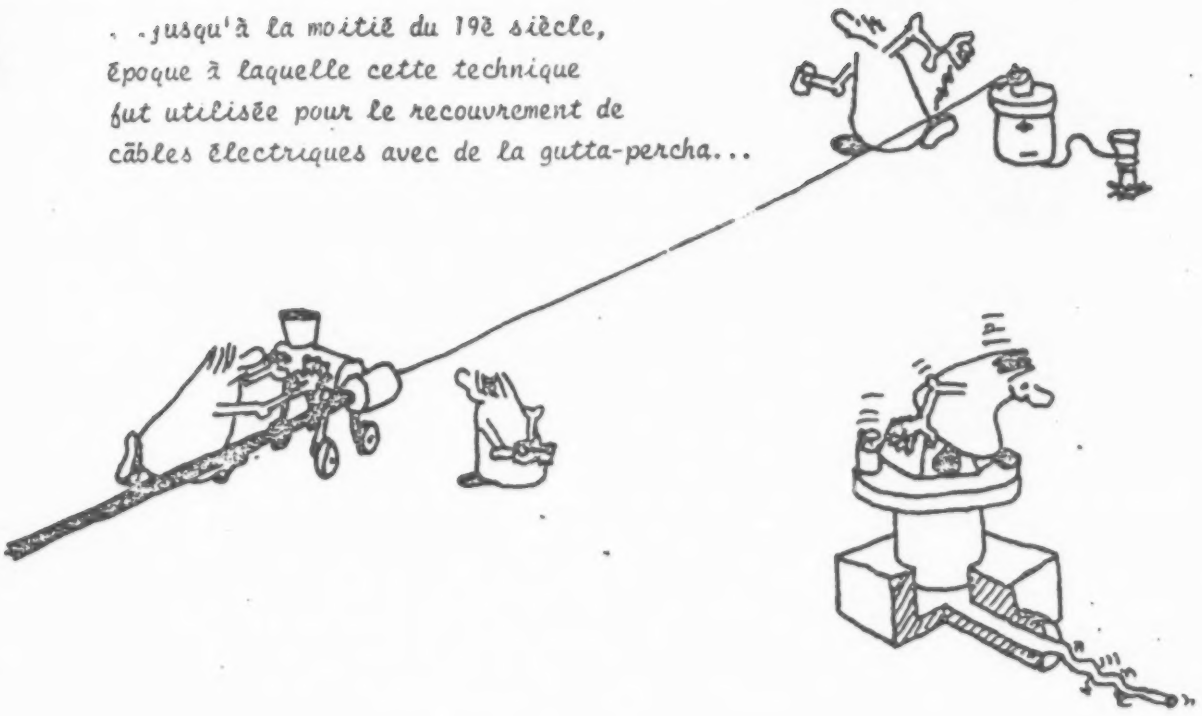
. et autres)...

... de briques et de céramique.

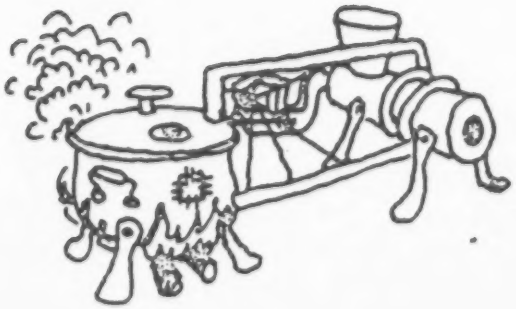


A la fin du 17è siècle on commença à extruder des tuyaux de plomb, l'extrusion en resta là.

. .jusqu'à la moitié du 19è siècle, époque à laquelle cette technique fut utilisée pour le recouvrement de câbles électriques avec de la gutta-percha...



.. Les machines étaient alors du type à piston, actionnées manuellement, puis hydrauliquement ou mécaniquement...



... En 1879 les extrudeuses à vis font leur entrée et vers 1930, avec l'apparition de nouvelles matières thermoplastiques le chauffage à la vapeur est peu à peu abandonné.

FACTEURS D'OPERATION - EXTRUSION

1. LES CARACTÉRISTIQUES DE L'EXTRUDEUSE.

2. LA GÉOMÉTRIE DE LA VIS.

3. LA CONCEPTION DE LA FILIÈRE.

4. LE TYPE DE MATIÈRE.

5. LA GÉOMÉTRIE DU PRODUIT.

6. LA CAPACITÉ DE REFROIDISSEMENT.

EXTRUSION DES THERMOPLASTIQUES (1/21)

1. GÉNÉRALITÉS

1-1. Principes de fonctionnement des extrudeuses.

L'extrusion est une technique de transformation des matières thermoplastiques qui permet d'obtenir des objets finis ou semi-ouvrés par un **processus** technologique **continu.** Cette technique, modifiée par l'adaptation d'un matériel approprié, permet d'élargir l'assortiment d'objets fabriqués. Cela permet d'étendre la gamme de produits à partir des profilés rigides et souples à la fabrication des plaques, des feuilles, des films, des objets creux, des granulés plastifiés, des câbles multifils et multicolores, des films et des feuilles stratifiés, des profilés expansés et allégés, etc.

La presque totalité des matières thermoplastiques est soumise a extrusion pendant la transformation, mais seulement une partie en sort sous forme d'objets finis. L'extrusion est largement utilisée pour la fabrication des granulés et des compounds transformés ensuite par d'autres méthodes (ex. : injection) et des produits semi-ouvrés tels que : plaques, feuilles, films, tubes, etc.

Indépendamment du principe de fonctionnement chaque extrudeuse accomplit trois actions principales :

1° elle transporte le long du cylindre la matière du point d'alimentation à la filière; 2° elle la plastifie grâce au malaxage et à la chaleur apportée de l'extérieur, 3° elle augmente progressivement; la pression de la matière et la force à passer par la filière qui lui donne la section solidifiée ensuite par le refroidissement.

Il existe plusieurs systèmes d'extrudeuses basés sur le travail d'une, de deux ou de plusieurs vis et sur les mécanismes sans vis. Bien que toutes les machines aient leurs avantages et leurs inconvénients, l'écrasante majorité des extrudeuses dans l'industrie est composée de machines à une et à deux vis. Les extrudeuses à trois ou à plusieurs vis ne présentent actuellement qu'un petit pourcentage du parc de machines dans les ateliers d'extrusion et nous allons les omettre dans ce chapitre.

L'extrudeuse à une ou à plusieurs vis est une machine conçue pour un travail en continu et son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de frottement de la matière plastique sur le métal dans des conditions appropriées.

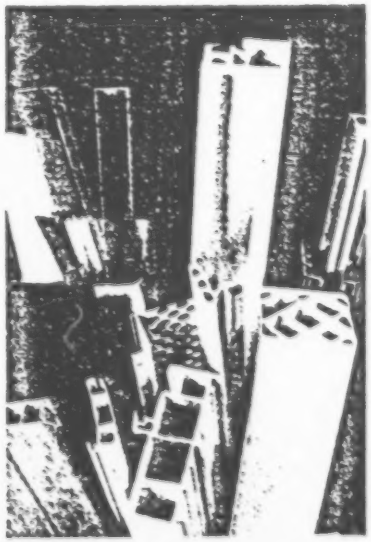


Photo SOLVAY

Le mécanisme du fonctionnement des extrudeuses dépend de leur conception. Les extrudeuses à une vis et à plusieurs vis se différencient non seulement du point de vue de leur construction, mais aussi du point de vue de leur application, compte tenu des différences dans le principe de leur fonctionnement.

1-2. Matières extrudées. L'extrusion conduisant à la production en continu de profilés peut être appliquée en pratique à toutes les matières thermoplastiques.

L'adaptation et le choix du matériel concernent : la vis c'est-à-dire sa longueur, son rapport de longueur au diamètre, son profil et son taux de compression, le système d'alimentation, le type d'extrudeuse (monovis ou à deux vis), sa puissance, la filière, l'équipement de contrôle, l'équipement de réception, etc...

D'autre part l'application des dérivés de l'extrusion, par exemple le gonflage du film ou l'extrusion des feuilles diminue la gamme des matières transformées et en même temps augmente les exigences concernant la machine et son équipement.

Pour les techniques plus faciles à réaliser comme : le câblage, l'extrusion de tubes très minces, de profilés complexes, certaines précautions doivent être prises si les exigences dimensionnelles sont élevées.

Il est difficile de donner à ce sujet des chiffres exacts et le transformateur doit consulter en pareils cas le fournisseur de la matière transformée.

1-3. Domaine d'applications et techniques dérivées.

— L'adaptation d'un équipement adéquat au matériel d'extrusion permet d'obtenir une large gamme de produits fabriqués à l'aide de cette machine.

— Par exemple, on utilise l'extrudeuse comme élément de base pour :

a) la production des profilés pleins ou tubulaires, rigides ou souples, calibrés ou non, enroulés ou coupés à la longueur demandée.

Appartiennent à cet assortiment de production : les profilés multicouleurs, les profilés en matières expansées, les profilés composites dont une partie de la section est par exemple rigide et une autre souple (figure 1).

b) La fabrication de plaques ou de feuilles en continu, composées d'une ou de plusieurs couches superposées par coextrusion.

c) Le revêtement de fils, de câbles et de profilés par ex. en métal ou en bois

d) La production de fibres synthétiques à tisser, à retordre et à assembler.

e) La production d'articles creux par extrusion-soufflage.

f) La production de films et de gaines minces par extrusion-gonflage. Cette technique permet de fabriquer des films composés de plusieurs couches par co-extrusion.

g) La préparation de granulés plastifiés et colorés à partir de poudres (mélanges-maîtres de coloration, compoundage).

h) Le dégazage, l'extraction d'impuretés volatiles, la polymérisation en continu pour l'industrie de fibres synthétiques.

i) Le revêtement par une ou plusieurs couches (par ex. hétérogènes) du papier et du carton pour l'industrie de l'emballage.

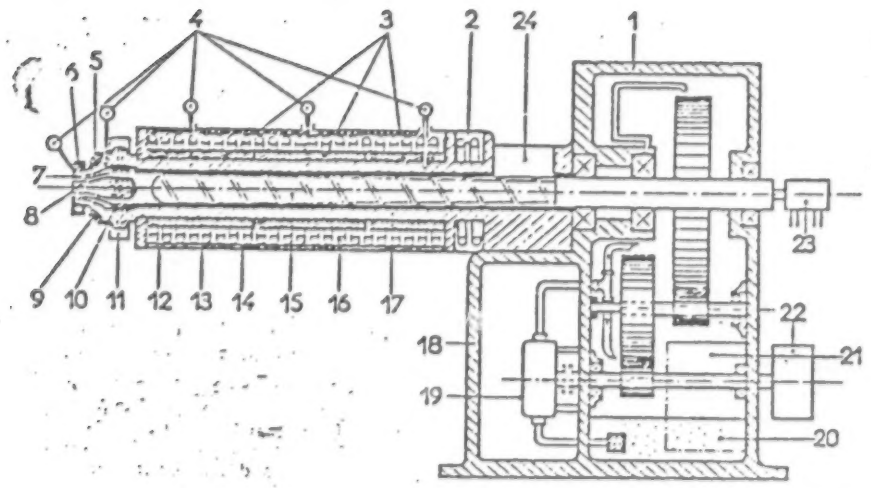
j) D'autres applications spéciales comme : l'alimentation de calandres, le recyclage de déchets (film de PE, bouteilles de PVC, etc.), la préparation de mélanges spéciaux.

2

1

5

COMPOSANTES DE L'EXTRUDEUSE



1 Bâti
2 Refroidissement de la goulotte
3 Chauffage du corps
4 Prises de température
5 Chauffage tête
6 Chauffage filière
7 Filière
8 Poinçon
9 Tête
10 Filtre
11 Collier de serrage
12 Capot
13 Chemise
14 Calorifugeage
15 Vis
16 Refroidissement du corps
17 Corps
18 Bâti
19 Pompe pour graissage automatique
20 Bac d'huile
21 Boîte de vitesse
22 Poulie à gorge
23 Refroidissement de la vis
24 Goulotte d'alimentation

FIGURE 1

2. EXTRUDEUSES ET LEUR CONSTRUCTION

2-1. Extrudeuse monovis.

2-1-1. Fonctionnement :

— L'extrudeuse monovis est de loin la machine la plus répandue dans l'industrie de transformation des thermoplastiques. La figure 1 explique le principe de fonctionnement de ce type de machine.

La matière brute sous forme de poudre ou de granulés est introduite à l'extrémité d'une vis d'Archimède qui tourne dans un cylindre régulé en température.

— Le déplacement de la matière résulte de l'action des filets de la vis sur la matière qui frotte ou adhère à la paroi interne du cylindre. Si la matière colle à la vis, l'effet d'extrusion est nul (fig. 2), au contraire, l'adhérence de la matière au cylindre augmente le processus d'écoulement (fig. 3).

— Le coefficient de frottement varie avec la température et la matière extrudée, ce qui impose le chauffage du cylindre de la machine (fig. 4).

— En réalité l'écoulement de la matière dans le canal de la vis pendant la rotation de l'extrudeuse résulte de l'action de quelques forces composantes.

— La figure 5 représente schématiquement la vis dans le cylindre de l'extrudeuse.

— La vitesse périphérique de la vis « U » peut être décomposée en : « T » — perpendiculaire au filetage, et « V » — parallèle à l'axe du canal de la vis.

— Quatre forces donnent la résultante qui agit sur la matière :

La première est due à l'entraînement de la matière qui adhère à la paroi du cylindre et qui est raclée par le sommet des filets.

— Le mouvement oblique des filets pousse la matière le long du canal mais en direction opposée au vecteur V. Nous l'appelons, « écoulement de transport », dont la vitesse est la plus grande au fond du canal et diminue en direction de la paroi du cylindre.

— La deuxième force composante T est perpendiculaire à l'axe longitudinal du canal de la vis. L'écoulement qui en provient n'intervient pas dans le débit de l'extrudeuse mais joue un rôle important dans le malaxage de la matière et dans le transport de la chaleur.

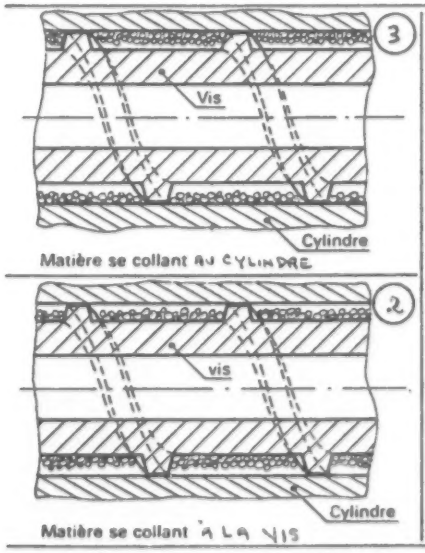
— La troisième force composante résulte de l'accroissement de la pression dans le cylindre et sa direction est opposée à la direction de l'écoulement Q. Elle apparaît quand la section à la sortie du cylindre est rétrécie (p. ex. par la filière et le tamis de la tête), et nous appelerons la valeur de son débit Qp.

— Cette force s'oppose au mouvement de transport et provoque une augmentation de pression dans la partie avant de l'extrudeuse.

— A la suite de ce phénomène une partie de la matière passe par la filière et l'autre recule le long du canal de la vis.

— La quatrième composante d'écoulement Qs, représente la fuite de la matière par le jeu entre le cylindre et le sommet des filets de vis. Ce jeu est relativement petit (0,08 à 0,18 mm) et dépend en général de la matière.

— L'extrudeuse qui fonctionne sans filière (avec la tête démontée), donne le débit maximal, parce que l'écoulement dû à la pression et la fuite tombent à O. D'autre part quand la filière de l'extrudeuse est fermée, la pression atteint la valeur maximale ; l'écoulement de transport sera équivalent à l'écoulement de pression et l'écoulement par la fuite.



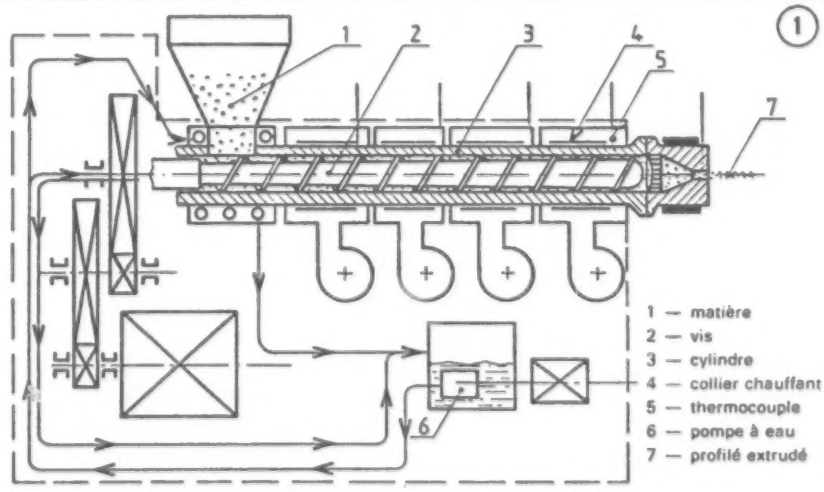
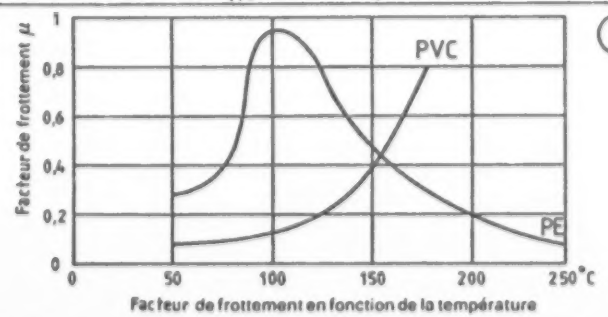
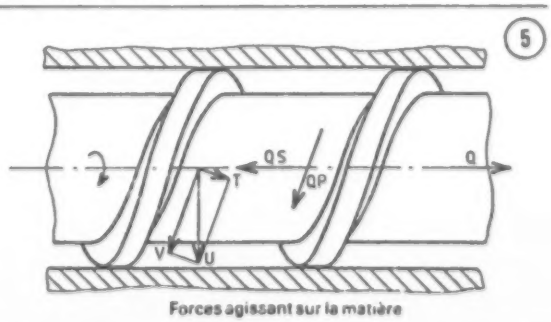


Schéma d'une extrudeuse



Facteur de frottement en fonction de la température



Forces agissant sur la matière

EXTRUSION DES THERMOPLASTIQUES (3/21)

2-1-2. Principaux éléments des extrudeuses monovis.

— L'extrudeuse monovis représentée sur la fig. 1 se compose de cinq modules.

a) vis-cylindre avec leur équipement,
b) groupe moteur,
c) tête d'extrusion porte filière,
d) châssis,
e) centrale de commande et de contrôle.

2-1-2-1. Vis (géométrie, construction).

Elle représente l'élément principal de l'extrudeuse et caractérise les possibilités de la machine. La vis, qui tourne à l'intérieur d'un cylindre chauffé, est entraînée par un moteur électrique. Son centrage est assuré par le cylindre dont l'ajustage et la dureté sont très étudiés par le constructeur de la machine.

— **Le jeu** entre le sommet des filets de la vis et le cylindre varie de **0,8 à 0,12 mm** pour les diamètres ≤ 40 mm et de **0,12 à 0,18** pour les cylindres de ø 40 à ø 63 mm.

— **La longueur de la vis** est exprimée par le nombre des diamètres auquel elle est égale. Dans les machines modernes elle se situe entre **20 et 35 diamètres.**

— Le dessin optimal de la **vis** dépend de la matière extrudée et de la filière montée dans la tête de la machine. Elle peut être à **pas constant,** ou à **pas successifs différents**; le noyau de la vis peut être cylindrique ou conique (fig. 2).

— Les vis en acier allié à haute résistance à la fatigue sont nitrurées, trempées à la flamme ou stellitées. Elles possèdent un canal de refroidissement percé soit sur toute la longueur, soit sur une partie.

— **L'angle optimal de la spirale** dans cette zone dépend de la consistance de la matière extrudée — **(pour une poudre $\alpha_{opt} = 30°$, pour des granulés $\alpha_{opt} = 15°$).** Dans les machines industrielles on utilise un angle de 20 à 25°, ce qui présente un compromis pour la plupart des matières extrudées.

— Les constructeurs offrent un grand nombre de profils de vis spécialement conçues pour différentes matières qui peuvent être montées en s'ajustant avec les cylindres sur les extrudeuses de leur fabrication.

2-1-2-2. Zones fonctionnelles de la vis.

Fonctionnellement la vis se compose de trois zones différentes : **une zone d'alimentation** ou d'entrée, une **zone de compression** ou de fusion et une **zone de régularisation,** appelée aussi — zone de sortie.

— C'est dans la **zone d'entrée** (alimentation) que se développe «la force de poussée». Pour y parvenir il est nécessaire que la matière ne tourne pas avec la vis, mais qu'elle soit retenue dans sa rotation par le cylindre. Au contraire, elle doit glisser sur la vis dont la surface sera polie et la température sera inférieure à celle du cylindre grâce à un circuit de refroidissement incorporé dans le noyau de la vis. La température du cylindre (réglée à l'aide de colliers chauffants) sera choisie de manière à augmenter le coefficient de frottement.

— Dans la **zone centrale** (de fusion) la température de la matière augmente par l'apport de chaleur de l'extérieur et par le travail des forces de cisaillement au sein du matériau. Le brassage dans le canal de la vis contribue à la répartition uniforme des températures dans la matière.

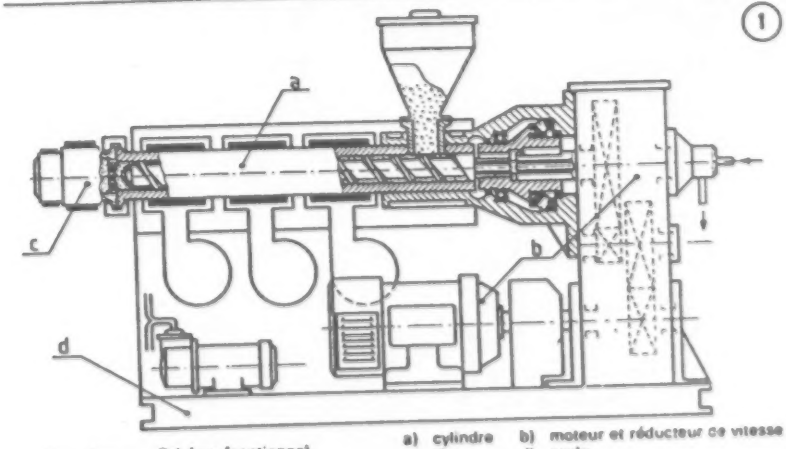
— Dans cette zone, les granulés se transforment en masse fondue, ce qui est accompagné par la diminution du volume apparent. Ce phénomène est compensé par le rétrécissement de la section du canal de la vis, obtenu par la conicité du noyau (le pas de la vis restant constant) ou par un pas successif diminuant avec un noyau cylindrique.

— Le rapport de la section du canal S_e à l'entrée de cette zone, à la section S_s à la sortie, est appelé le taux de compression T_c, et correspond au rapport du volume apparent de granulés au volume de la matière fondue.

— La longueur de la zone de compression dépend de la nature physique et chimique de la matière extrudée.

— Plusieurs matières ont tendance à dégager dans cette zone des corps volatils. Les constructeurs ont résolu ce problème en provoquant la décompression par la diminution du taux de compression de la vis et par l'aspiration des gaz au travers d'un orifice de ventilation (dégazage ou désaération).

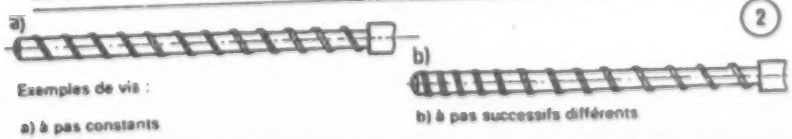
— Dans la **troisième zone** s'effectue **le brassage,** le mélange et l'homogénéisation de la matière fondue. Pour une meilleure répartition de la chaleur, la profondeur des filets de la vis diminue. Souvent, dans cette zone, on introduit une sorte de chicane (fig. 3), qui augmente l'effet de malaxage.



1

Extrudeuse — Schéma fonctionnal

a) cylindre b) moteur et réducteur de vitesse
c) tête d) socle

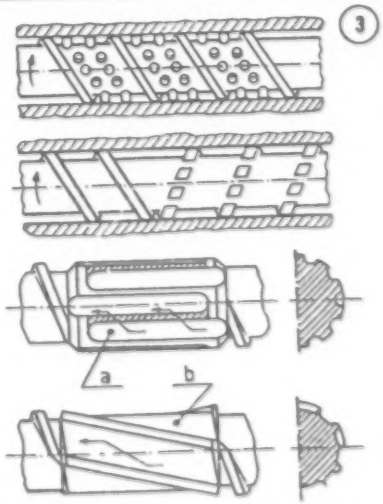


2

Exemples de vis :

a) à pas constants

b) à pas successifs différents



3

Dispositif de malaxage et de cisaillement incorporés dans la zone de pompage de vis.

a) système : Union Carbide b) système : Troester

Doc : BAYER

2-1-2-3. Cylindre.

— Le cylindre de l'extrudeuse est soumis à des efforts mécaniques et thermiques considérables. Il doit être muni d'un côté d'un système mécanique de couplage avec le bâti de la machine (bloc enfermant la butée et le groupe d'entraînement) et de l'autre côté d'un système de fixation de la tête d'extrusion.

— Le montage et le démontage du cylindre est rapide et très robuste (p. ex. à bayonnette) ; la fixation de la tête peut être à collier bicônique (fig. 1), à brides et boulons, à filetage ou à baïonnette, ce qui permet d'échanger très rapidement adaptateurs et filières.

— Le cylindre est exécuté en acier ; il est calculé pour résister à la pression de 700 bars à chaud. Selon sa taille il est exécuté en acier nitruré ou est revêtu à l'intérieur d'une couche bi-métallique de type « X-Alloy » ou « Reloy ». Sa résistance à l'usure par abrasion et à la corrosion est très grande (la dureté dépasse souvent 60 HRc). Certains constructeurs utilisent des cylindres dont la chemise se compose de 3 à 5 segments, ce qui réduit les frais de rénovation de l'extrudeuse.

2-1-2-4. Chauffage et régulation de la température.

— Le cylindre est chauffé et refroidi ce qui permet de répartir et de maintenir avec précision la température adéquate dans toutes les zones (tabl. 5).

— En général ce chauffage est assuré par résistance électrique ou par induction (colliers chauffants répartis le long du cylindre).

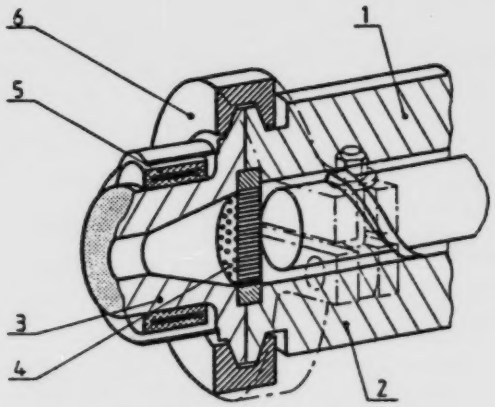
— Le refroidissement peut être assuré par circulation forcée d'air autour du cylindre ou de fluide introduit dans les tubulures de circulation autour du cylindre.

— La zone située au niveau de l'orifice d'alimentation est refroidie (en général par circulation d'eau) pour empêcher le collage de granulés et la formation d'une voûte de matière dans la trémie qui couperait l'alimentation (fig. 2).

— Chaque zone de chauffage est équipée d'un régulateur de température (en général PID à modulation) dont l'affichage se trouve sur l'armoire de commande de l'extrudeuse.

— La puissance des éléments de chauffage dépend du diamètre de la vis et du rapport L/D. Sur le tableau 2 nous présentons à titre d'exemple la relation entre ces valeurs d'après la S^{te} SAMAFOR.

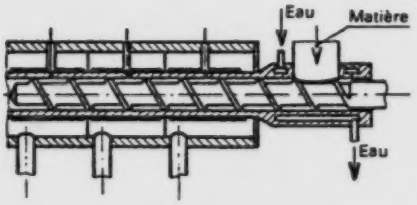
(1)



Tête à fixation par brides et collier de serrage

1 — vis 4 — filtre
2 — corps du cylindre 5 — chauffage
3 — corps de la tête 6 — collier de serrage

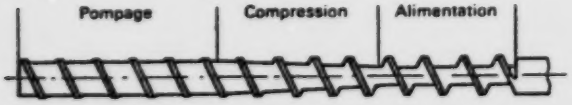
(2)



Refroidissement de la zone d'alimentation

(3)

(Valeurs données à titre indicatif)
Repartition de températures des différentes zones de l'extrudeuse en fonction de la matière extrudée



(5)

Matière	Pression en MPa	Température en °C. zone d'alimentation	zone de compression	zone de pompage	Tête	Filière
PVC rigide	100-200	155	165	175-185	180	185
PE basse densité	90-150	125	125	130	130	135
PE haute densité	100-180	140	160	165	165	170
PA	150-250	275	225	225-235	225	225
PVC plastifié (60 %)	50-120	175	165	150-160	160	160
CA	150-200	175	195	200	200	205
PP (polypropylène)	150-200	185	200	220-230	230	240
POM (polyoxyméthylène)	50-100	170	190	205	200	200
PUR (polyuréthanne)	150-300	270	260	250-260	270	280

(4)

Puissance des éléments de chauffage

DIAMÈTRE DE VIS mm	60	75	90	120	150	200
L/D	22/1					
CHAUFFAGE CYLINDRE kW	10	11	15	31	45	86
NOMBRE DE ZONES	3	3	3	4	5	7
L/D	28/1					
CHAUFFAGE CYLINDRE kW	14	15	21	44	62	111
NOMBRE DE ZONES	4	4	4	5	7	9
L/D	35/1					
CHAUFFAGE CYLINDRE kW	17	19	27	56	82	151
NOMBRE DE ZONES	5	5	5	6	9	12

2-1-2-5. Évolution de l'extrudeuse monovis.

— L'extrudeuse monovis est relativement simple du point de vue de la construction et du principe de fonctionnement, mais présente une étendue de possibilités insuffisantes surtout en présence des nouveaux polymères qui apparaissent sur le marché.

— Le rendement de la vis classique ne dépasse pas 20 à 40 % et est inversement proportionnel à la vitesse de rotation ; la zone de compression est trop éloignée de l'alimentation ; l'homogénéisation mécanique et thermique est insuffisante, etc.

— Depuis les années soixante, on a fait plusieurs recherches pour améliorer le rendement de l'extrudeuse monovis même avec les matières qui exigent une machine à deux vis (p. ex. le PVC plastifié en "dry-blend" -poudre sèche).

— On est ainsi arrivé aux vis dites à deux étages (fig. 1) avec la zone de décompression et le dégazage dans la partie centrale.

— Certains constructeurs ont augmenté le rendement de fusion dans la zone de compression par l'incorporation d'un deuxième filet uniquement le long de cette partie de la vis (fig. 2) — vis BM-C. Maillefer. On a obtenu ainsi des débits considérablement plus élevés qu'avec les vis conventionnelles.

— D'autres solutions ont été proposées (fig. 3). L'extrudeuse à deux étages en « L » dans laquelle le premier étage chauffe, pousse, comprime, décomprime et dégage la matière, et le deuxième étage l'homogénéise et l'extrude par la filière.

— Le système dérive du partage des rôles de la vis à deux étages, décrite ci-dessus. Par un meilleur contrôle thermique des deux corps de la machine et par la possibilité de réglage indépendant des vitesses, on obtient une excellente souplesse de l'ensemble. Ces extrudeuses peuvent transformer une large gamme de matières avec un rendement élevé.

2-1-3. Groupe moteur-entraînement de la vis.

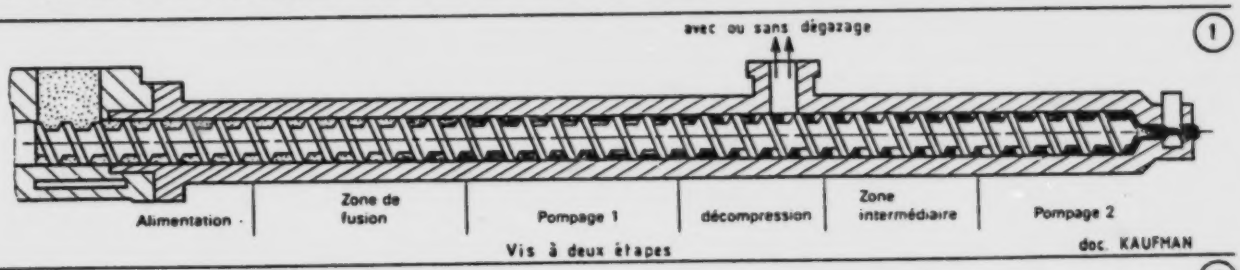
— La réaction axiale de la vis (plusieurs kN) est équilibrée par la butée (fig. 4), composée d'un ensemble de roulements.

— Derrière la butée se trouve l'ensemble de transmission : le réducteur de vitesse, le variateur de vitesse (si le moteur est à vitesse constante), l'embrayage de sécurité (limitateur du couple), l'admission de l'eau de refroidissement de la vis, le graissage de l'ensemble mécanique et le moteur principal, éventuellement à vitesse variable.

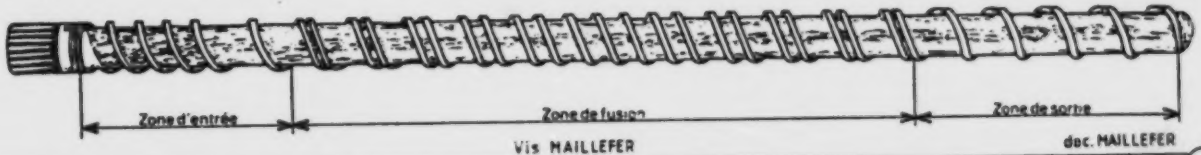
— La puissance du moteur électrique dépend des caractéristiques de l'extrudeuse — ces relations sont présentées sur le tableau 5.

— On retrouve dans l'équipement d'une extrudeuse d'autres moteurs électriques : du ventilateur ou de la pompe de refroidissement, de la pompe à vide du dégazage, du chargeur automatique et du doseur de colorants ou d'adjuvants dont sont équipées les extrudeuses modernes.

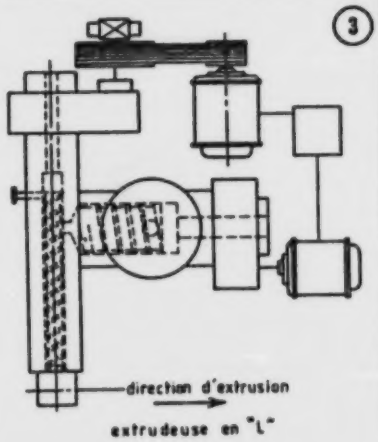
— Le dégazage en trémie sous vide est de plus en plus utilisé sur les extrudeuses. Il a pour objet d'aspirer hors de la matière à transformer et de l'atelier : les monomères résiduels, l'humidité, l'air, les gaz, les vapeurs d'additifs à bas point d'ébullition. Outre les avantages en ce qui concerne l'hygiène du travail, ces dispositifs améliorent le rendement de l'extrudeuse.



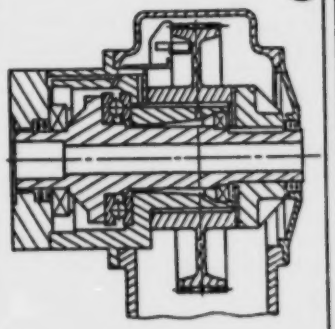
1 — Vis à deux étapes — doc. KAUFMAN



2 — Vis MAILLEFER — doc. MAILLEFER



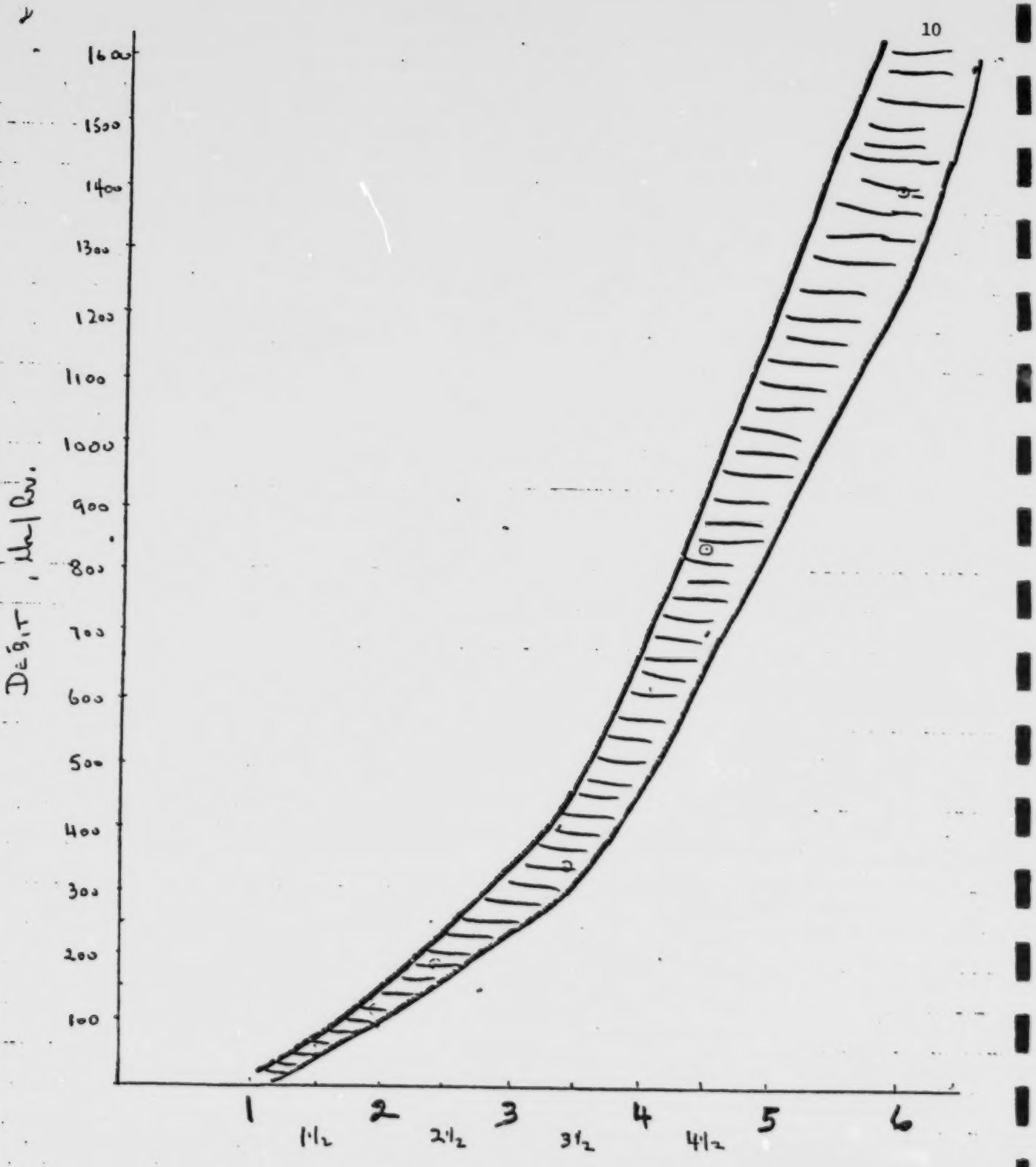
3 — extrudeuse en "L"

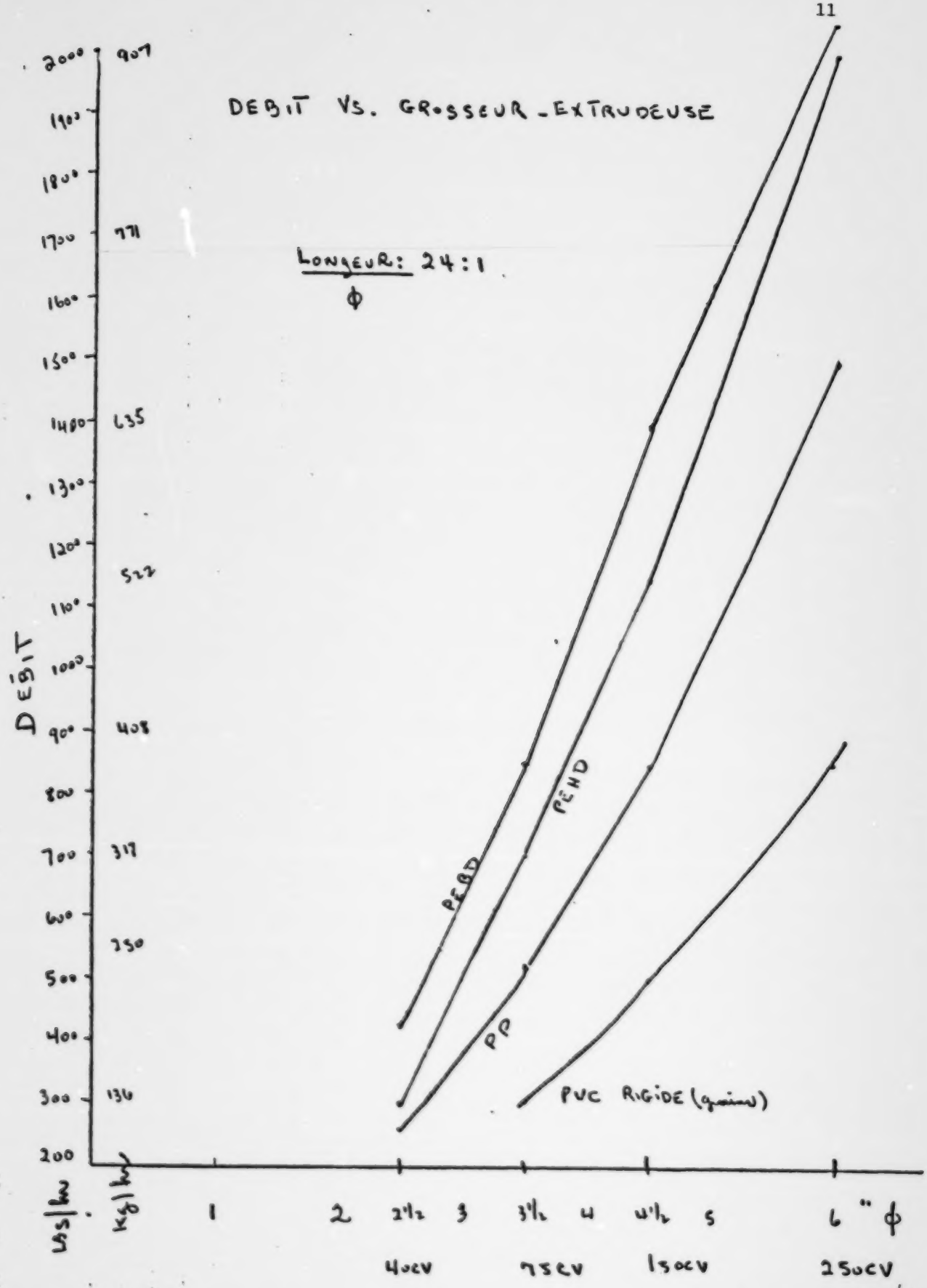


4 — butée

5 — Puissance moteur — Doc SAMAFOR

DIAMÈTRE DE VIS mm		60	75	90	120	150	200
PUISSANCE MOTEUR	de	15 (20)	22 (30)	33 (45)	81 (110)	113 (160)	192 (260)
kW	à	33	52	81	160	258	552
(ch)		(45)	(70)	(110)	(217)	(350)	(750)
VITESSE MAX. VIS	de	48	41	41	40	41.5	46
t/min	à	181	166	148	151	140	133
RAPPORT DE RÉDUCTION	de	9.96	10.8	12.1	11.9	12.8	12
	à	37.2	43.7	44.1	45	43.3	39.1
COUPLE VIS	de	180	280	530	1030	1790	4000
m. daN	à	300	525	785	1970	3740	5000


1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
DÉBIT, lbs/hr.
1
1 1/2
2
2 1/2
3
3 1/2
4
4 1/2
5
6
GROSSEUR - EXTRUDEUSE, po.
24:1 L/D


DEBIT VS. GROSSEUR - EXTRUDEUSE
LONGEUR: 24:1
Φ
DEBIT
Lbs/hr
Kg/hr
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
907
771
635
522
408
317
250
136
HDPE
PEND
PP
PVC RIGIDE (9mm)
1
2
2½
3
3½
4
4½
5
6 " Φ
40cv
75cv
150cv
250cv

TABLEAU

REVETEMENT METALLIQUE
CYLINDRE INTERIEUR ET VIS

	CYLINDRE		VIS
THERMOPLASTIQUES	XALOY 101	XALOY 306	
ABS	X	-	CHROME
NYLON	X	X	70-72 Rc
PC	X	X	
PE	X	-	
PP	-	X	CORPS DE LA VIS
			ACIER (CARBON STEEL)
PS	X	-	4140 30 Rc
PVC	-	X	4340 40 Rc

XALOY 101 = ALLIAGE DE FER 58-64 Rc
HAUTE RÉSISTANCE À L'USURE

2 mm d'épaisseur

XALOY 306 = ALLIAGE DE CHROME, COBALT, NICKEL
RÉSISTANCE SUPÉRIEURE À LA CORROSION
ET À L'ABRASION.

EXTRUSION DES THERMOPLASTIQUES (6/21)

2-1-4. Tête d'extrusion - porte filière.

2-1-4-1. Construction de la tête.

— La tête présente un élément monté au bout du cylindre de l'extrudeuse, en aval de la vis. Son rôle est de laisser passer la matière plastifiée par la filière qui lui donne la forme de la section voulue.

— Plusieurs filières différentes peuvent être montées dans la même tête à condition que leurs gabarits correspondent aux dimensions de cette dernière et que l'ensemble réponde au diamètre de la vis.

— Entre le cylindre et la tête est fixé le **porte-tamis,** appelé aussi la grille de répartition (fig. 1). Il se compose généralement d'une ou de deux plaques d'acier au chrome percé de trous. Entre les deux plaques (ou dans le cas d'une plaque unique, en amont de celle-ci) sont empilés des tamis.

— Leur rôle n'est pas limité au seul filtrage des impuretés. Ils assurent une contre-pression en bout de vis et régularisent le flux de matière. **L'épaisseur des grilles** varie de 6 à 50 mm, et le diamètre des **orifices** dépend de la taille de l'extrudeuse (0,8 à 5 mm et plus). Les bords d'orifices sont profilés pour éviter la création de zones de stagnation de la matière.

— De temps en temps, le nettoyage des grilles est nécessaire. On utilise de plus en plus des changeurs de filtres automatiques sans coupure de l'écoulement, montés entre la tête et le cylindre (fig. 2).

2-1-4-2. Types de têtes.

— On distingue quatre types de têtes :

— **La tête d'extrusion droite** pour la fabrication des profilés et des tubes - fig. 1.

— **La tête d'équerre verticale** pour : l'extrusion-soufflage, l'extrusion-gonflage et l'extrusion de filaments - fig. 3.

— **La tête d'équerre horizontale** ou oblique pour le recouvrement de câbles et de profilés - fig. 4.

— **Les têtes spéciales** pour : l'extrusion de feuilles et de plaques (têtes plates), l'enduction du papier, la co-extrusion appliquée aux produits fabriqués avec les trois types ci-dessus.

2-1-4-3. Filières.

— Dans chacune des têtes, la filière est l'outil qui donne la forme au flux de la matière plastifiée, afin d'obtenir le profil demandé. Elle est amovible et doit se démonter facilement pour être nettoyée ou changée. (Acier traité ou acier au chrome.)

— Du point de vue fonctionnel on peut classer les filières de la façon suivante :

a) **filières sans poinçon :** pour les profils pleins (joncs, fils, plaques, profils à sections diverses).

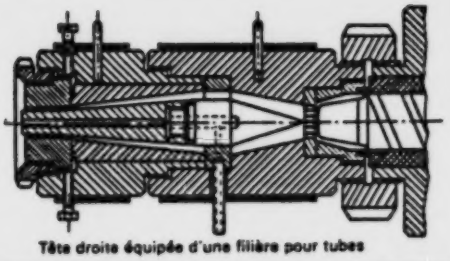
b) **filières avec poinçon :** pour les profils creux (tubes à section circulaire, rectangulaire ou autre, paraisons, gaines, etc.).

c) **filières avec poinçon montées sur tête équerre**
— pour la réalisation de gainages des profils en métal ou autres matières.
— pour la réalisation de gaines gonflées.

d) **filière pour la co-extrusion** (à entrées multiples pour les profils pleins, pour le gainage et pour l'extrusion de films) fig. 5.

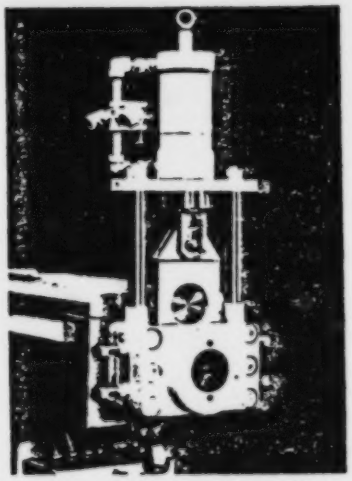
— La filière est fixée à l'extrémité de la tête — elle peut ou non dépasser l'extrémité de la tête.

— Certains types de filières exigent un centrage, généralement réalisé par les vis réparties radialement autour de la tête (fig. 1, page précédente).



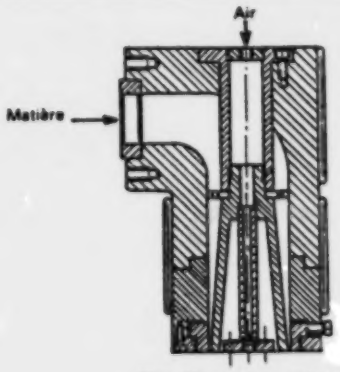
1

Tête droite équipée d'une filière pour tubes



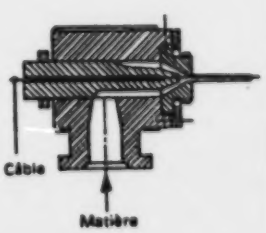
2

Changeur de filtre. Photo SMTP-Kaufman



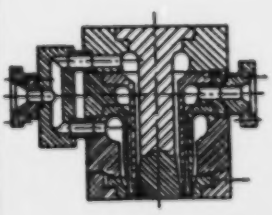
3

Tête d'équerre pour gaine soufflée



4

Tête d'équerre pour gaine de câbles



5

Tête d'équerre pour co-extrusion de la gaine gonflée

2-1-4-4. Chauffage de la tête.

— L'ensemble de la tête exige un chauffage très soigneusement réglé. Pour bien contrôler la température de la matière extrudée, on chauffe et on règle la température de la tête à trois niveaux ; la 1re zone se trouve au niveau de la grille, la 2e zone est située autour du poinçon et la 3e zone à la hauteur de la filière.

— Dans le cas du PVC rigide le chauffage de cette zone par l'intermédiaire d'un liquide est plus recommandé que par une résistance, celle-ci pouvant facilement provoquer la décomposition de la matière - Fig. 1.

— En général la température décroît vers la filière, ce qui est obtenu par des résistances électriques en colliers enserrant la surface de la tête. Leur répartition doit être faite de cette façon pour éviter toute zone de surchauffe — Fig. 2.

2-1-4-5. Forme et dimension de la filière.

— Pour que la filière façonne le flux de la matière et pour qu'elle lui donne le profil désiré, certaines conditions doivent être remplies.

• La matière plastifiée passe par les orifices de la grille (qui freine partiellement la rotation provoquée par le mouvement de la vis) et pénètre dans un canal qui change progressivement de section pour aboutir à la forme qui devrait imposer à la matière la section voulue.

• Un profil extrudé n'a pas en général la section de la filière d'où il est sorti. Il existe une différence qui peut être négative ou positive entre les dimensions de cette dernière et celles du profil extrudé.

• Les relations entre la pression, la viscosité, et la vitesse d'écoulement dans les canaux à section variable sont très complexes pour la matière plastique fondue (qui n'est pas un fluide Newtonien).

• La variation de viscosité influence très sensiblement l'écoulement par la filière, et si cette dernière est bonne par ex. pour les polyamides, elle apparaîtra mauvaise pour par ex. le PVC.

• L'écoulement de la matière fondue dans un canal donne la répartition des vitesses présentée sur les fig. 3 et 4.

• En passant par la filière, les macromolécules ont tendance à s'allonger là où la différence de vitesse des deux veines voisines est la plus grande c'est-à-dire près de la paroi. L'idéal serait d'obtenir une vitesse de défilement égale en tous les points de la masse plastifiée, ce qui est impossible en pratique. D'où la nécessité de corriger la section de la buse pour que le profilé extrudé prenne la forme voulue.

• Avant de sortir de la filière la matière doit traverser une zone appelée « parallèle ». D'après la nature de la matière extrudée et l'épaisseur du profilé, la longueur de cette zone varie. Par ex. pour le PVC rigide elle est de 8 à 10 fois l'épaisseur de la paroi du profil extrudé ; pour les matières dont la fluidité est grande comme par ex. le PEhd ou le polyamide, cette relation est de 15 à 20 pour 1.

• Ces valeurs se rapportent aux filières de tubes de diamètre ≈ 50 mm et dont les épaisseurs ne dépassent pas 2 à 3 mm.

• Pour les épaisseurs plus petites ce rapport sera plus faible.

• Les filières pour film en polyéthylène ont une longueur de 1,5 à 2 mm pour un entrefer de 0,5 mm.

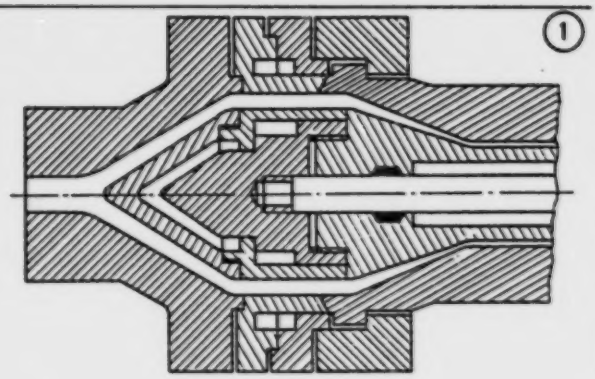
• Il est évident qu'en faisant varier la section de la filière pour la même vis il faut faire varier tous les paramètres dans les limites possibles pour avoir un rendement de la machine acceptable.

— En pratique on se sert de quelques règles empiriques en fixant le rapport de la section de la filière à la section du cylindre. Dans le cas du PE la surface maximale de la filière ne doit pas dépasser la moitié de la surface du cylindre. Pour les polyamides ce rapport varie entre 1/3 à 1/5. Mais pour les matières peu fluides comme les résines acryliques et le PVC on revient au rapport 1/2.

— Le dessin exact de la filière pour un profilé donné est très difficile à prédéterminer. En pratique on exécute une filière expérimentale, non traitée, et par les essais successifs et les corrections apportées aux sections le long du canal, on arrive aux dimensions et à la géométrie de la filière industrielle.

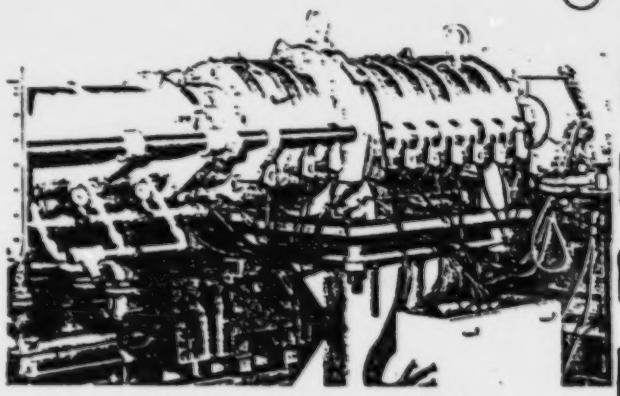
— Pour obtenir les profilés à des cotes précises il faut appliquer le calibrage ; cette technique est présentée dans le chapitre suivant.

1



Tête chauffée par liquide

2



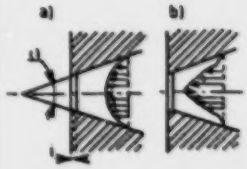
Photos EMS Samafor (colliers chauffants)

3

Écoulement de la matière dans un canal

1) — matière plastique fondue
2) — fluide newtonien

4



Répartition des vitesses dans la matière au moment du passage par la filière

a) matière fluide
b) matière visqueuse

2-1-5. Châssis.

— Les extrudeuses construites dans les années cinquante avaient en général des vis relativement courtes et leurs organes tels que : le moteur, la boîte de vitesses, le chauffage et le refroidissement étaient enfermés dans un châssis coulé en fonte.

— Les machines d'aujourd'hui sont construites d'après le principe modulaire c.-à-d. les organes sont groupés dans le châssis de l'extrudeuse avec une certaine souplesse qui permet de les contrôler et de les changer très rapidement.

— Cette solution permet par exemple dans certaines limites de se servir du même groupe moteur pour les différents vis et cylindres.

— Pour cette raison les châssis des extrudeuses modernes présentent une plate-forme en mécanosoudé. Sur ce socle très robuste, équipé de vis-vérin pour la mise à niveau et de rouleaux pour faciliter le déplacement, sont montés sous forme de modules indépendants et facilement accessibles : le moteur d'entraînement, le réducteur avec le bloc enfermant la butée et le groupe d'alimentation, le support du cylindre, le système de refroidissement par eau et par air et la pompe à vide pour le dégazage (fig. 1).

2-1-6. Centrale de commande et de contrôle.

— Dans les extrudeuses modernes tous les indicateurs concernant le fonctionnement de la machine et leur réglage sont groupés sur le panneau frontal de l'armoire de commande.

— En général, elle est conçue sous forme d'une caisse en tôle, qui peut être facilement déplacée. Le plus souvent, on la retrouve derrière le cylindre de la machine ou à côté à hauteur du groupe-moteur, ce qui permet à l'opérateur de l'observer et de contrôler le réglage (fig. 2).

— A l'intérieur de l'armoire se trouvent : les contacteurs et les appareils de protection pour chaque élément de chauffage, les fusibles et les disjoncteurs, les régulateurs de température, les barrettes de raccordement et autres appareils dont les cadrans sont placés sur le panneau de l'armoire.

— A l'extérieur se trouvent : les indicateurs et les régulateurs de température correspondant à chaque zone de chauffage du cylindre et de la tête. Souvent, les mêmes zones sont équipées d'ampèremètres.

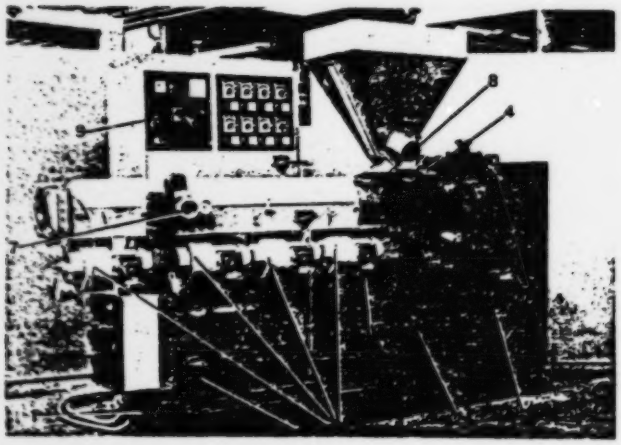
— On trouve sur les panneaux : les indicateurs de température de la matière dans le cylindre, dans la tête et filière, l'indicateur de charge du moteur et l'indicateur de vitesse de rotation de la vis.

— La commande de tous les moteurs électriques peut s'effectuer à partir du pupitre installé à part ou incorporé dans le panneau de l'armoire de contrôle.

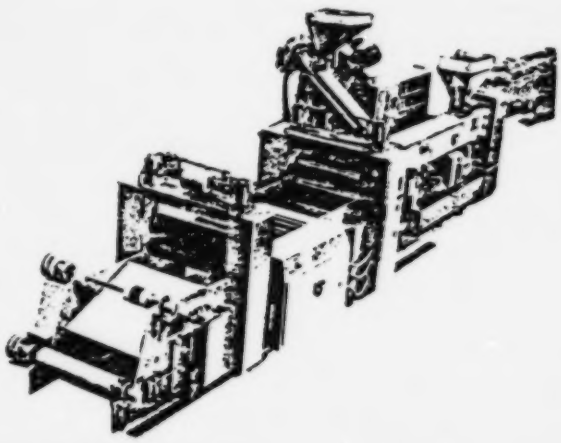
— Sur la partie avant du socle de la machine, il y a souvent un panneau avec des prises et des raccordements pour les têtes et leurs accessoires.

— Les lignes d'extrusion (voir § 3) sont équipées de plusieurs dispositifs adaptés à la réception, calibrage, contrôle et stockage de l'extrudat. L'ensemble de cet équipement varie avec l'assortiment de la production. Les organes de commande de ces dispositifs sont groupés en général dans des armoires séparées, placées non loin du poste du surveillant.

— La commande d'un tel ensemble devient de plus en plus complexe et les constructeurs commencent à incorporer les microprocesseurs que l'on retrouve en général sur le pupitre de commande.



1. Plateforme
2. Moteur
3. Réducteur
4. Butée
5. Pompe à vide
6. Ventilateurs
7. Dégazage
8. Bloc d'alimentation
9. Armoire de commande



Fabrication de feuilles co-extrudées

Photos SMPT-Kaufman

2-2. Extrudeuses à deux et plusieurs vis.

2-2-1. Extrudeuse à deux vis.

Cette machine joue un rôle important dans l'industrie de transformation grâce à la particularité qu'elle peut extruder toutes les matières thermoplastiques avec les mêmes vis.

— Son travail rappelle le fonctionnement d'une pompe à vis. Elle se distingue en outre par la régularité de son alimentation, ce qui entraîne une progression constante de la matière fondue.

— Ce genre de machines est beaucoup moins répandu dans l'industrie que les extrudeuses monovis, mais elles permettent d'extruder dans de bonnes conditions du PVC rigide à partir de poudre, de préparer des « compounds » (1)...

— l'extrudeuse à deux vis est à conseiller pour la production de profilés de grandes dimensions, en raison de la régularité, de la pression engendrée et du débit.

2-2-1-1. Principe de fonctionnement.

— L'extrudeuse se compose de deux vis qui tournent dans deux orifices du cylindre et dont les axes sont parallèles à l'axe principal de ce cylindre. L'écart des deux axes d'orifices correspond à la distance entre les deux vis dont les sommets entrent réciproquement dans les canaux (fig. 1).

— Le pas des deux vis peut être constant ou non et les noyaux peuvent être cylindriques ou coniques (fig. 2).

— Les deux vis (filetées à droite ou à gauche) peuvent tourner dans le même sens, ou une vis filetée à droite et une deuxième filetée à gauche peuvent tourner en sens inverse.

— Le cheminement de la matière dans l'extrudeuse à deux vis est différent de celui dans l'extrudeuse monovis.

— La matière remplit les canaux des deux vis par tranches divisées par la ligne de contact des vis.

— Si les deux vis tournent dans le même sens, la matière s'écoule dans un espace en forme d'un « 8 » légèrement déformé et subit un malaxage très fort (fig. 3).

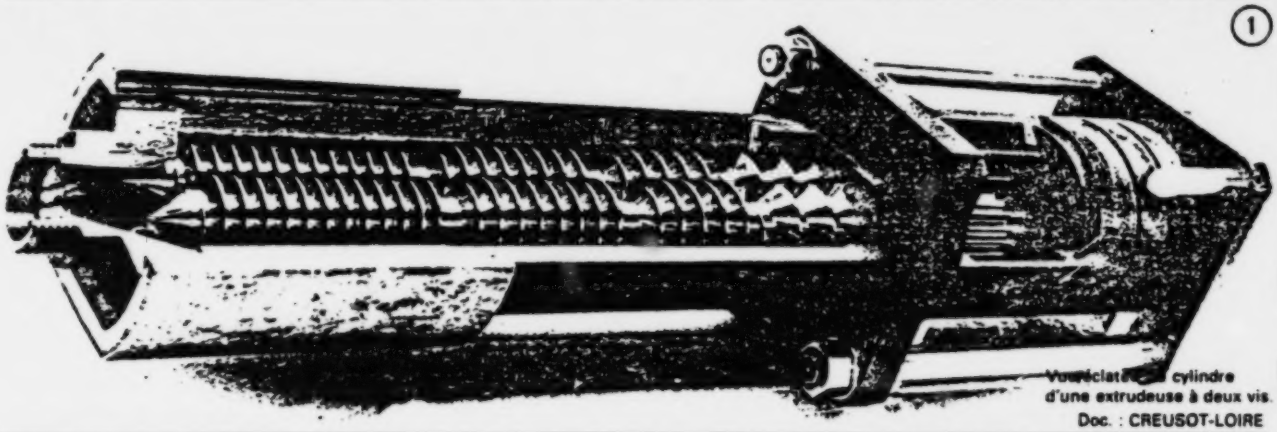
— Le passage d'une zone à une autre est réduit, mais l'effet de mélangeage est important.

— Dans le cas de la rotation en sens inverse, la matière est enfermée dans un espace en forme d'un « C ». Elle subit un broyage très fort en passant par la ligne de contact des vis.

— Cette action contribue à l'homogénéisation des produits extrudés.

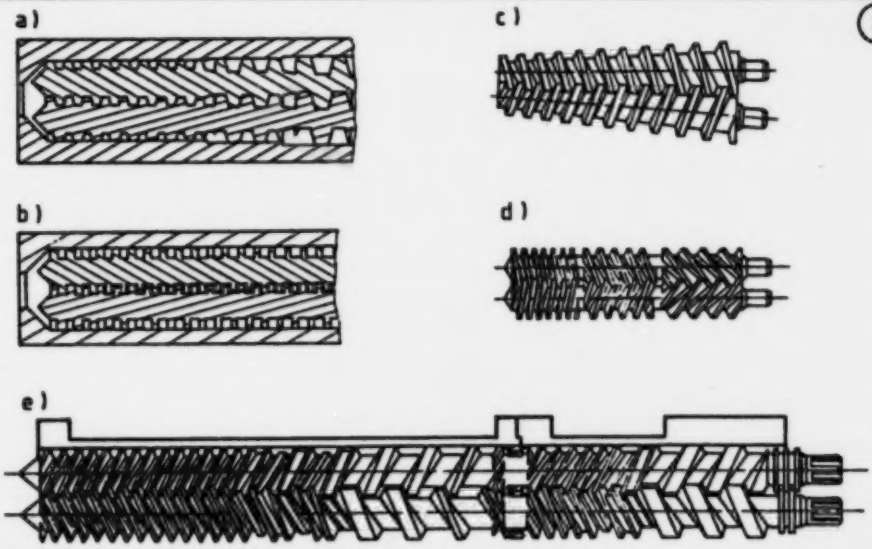
(*) *Compound : mélange polymère + charges, renforts, colorants...*

1



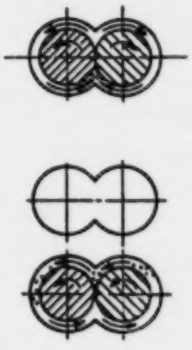
Vue éclatée d'un cylindre d'une extrudeuse à deux vis.
Doc. : CREUSOT-LOIRE

2



a) Coupe par vis-cylindre (type Colombo-Windsor)
b) Coupe par vis à l'épaisseur du filet variable.
c) Vis coniques.
d) Vis à 3 pas différents.
e) Vis à 2 stades avec la zone de décompression.

3



a) Vis contre-rotatives.
b) Vis co-rotatives.

2-2-1-2. Débit.

— Le débit de l'extrudeuse à deux vis est proportionnel à la vitesse de rotation des vis (fig. 1). Le rendement volumique des vis est assez important et indépendant de la pression. La puissance nécessaire à l'extrusion d'une machine monovis est proportionnelle au carré de la masse de matière extrudée, tandis que dans les extrudeuses double vis la puissance est relativement petite par rapport à la masse extrudée.

— Au contraire, l'énergie fournie par les éléments chauffants est plus importante. La vitesse d'extrusion admise pour les machines bi-vis dépend principalement des propriétés thermiques de mise en œuvre de la matière. Comme le dosage de la chaleur est mieux contrôlé, ces machines s'appliquent avec succès aux matières délicates comme par exemple au PVC non plastifié.

— Tous les apports concernant l'amélioration de l'effet de mélangeage, de l'homogénéisation et du dégazage présentés à l'occasion de la description de l'extrudeuse monovis sont retrouvés ici.

2-2-1-3. Construction.

— La construction de l'extrudeuse à deux vis est basée en général sur les mêmes principes que ceux des machines monovis.

— Le problème particulier des premières est la difficulté technique liée à une double butée (manque de place à la suite de l'écart des axes imposé par les diamètres de vis). La figure 2 présente une des solutions techniques envisagées.

— Une autre difficulté est liée à l'exécution du cylindre. Plusieurs techniques sont ici appliquées parmi lesquelles le soudage par faisceaux d'électrons de deux cylindres sectionnés longitudinalement (fig. 3).

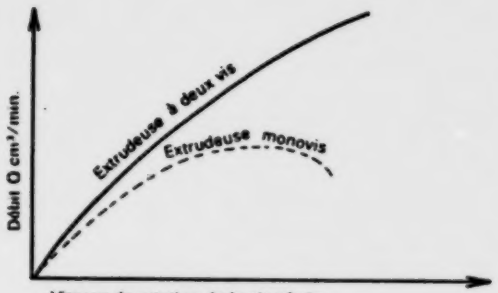
2-2-2. Extrudeuses multivis et extrudeuses spéciales.

— Il existe des extrudeuses à trois vis et plus qui travaillent sur le même principe que les machines bi-vis. Leur application dans l'industrie est rare (fig. 4).

— Depuis plusieurs années les constructeurs cherchent d'autres solutions pour les extrudeuses et essayent de remplacer les vis par d'autres éléments, moins coûteux, exerçant le rôle de plastification, de transport et de compression de la matière transformée.

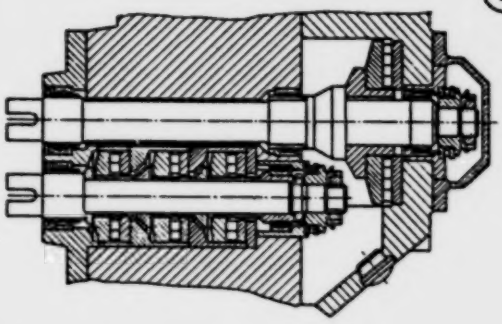
— Nous signalons l'existence de machines à disque, basées sur l'effet dit de « Weissemberg », les extrudeuses à engrenages et autres. Pour l'instant elles ne sont utilisées que dans des laboratoires de recherche (fig. 5).

(1)



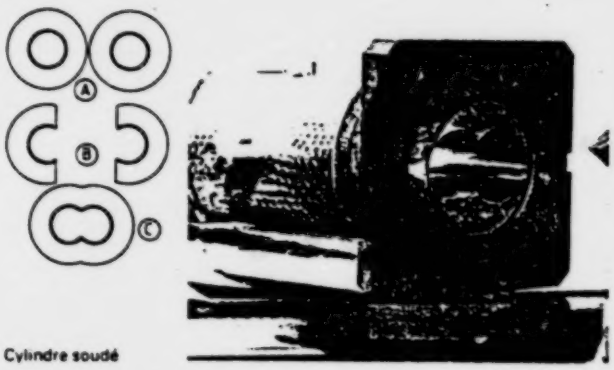
comparaison du débit de l'extrudeuse monovis et à deux vis

(2)



Butée de l'extrudeuse à deux vis

(3)



Cylindre soudé

(4)

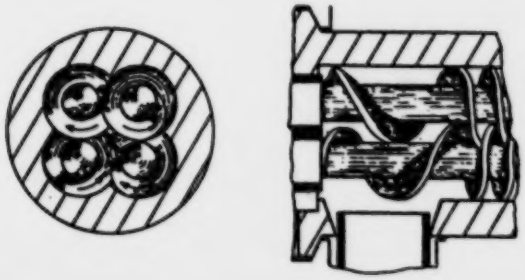
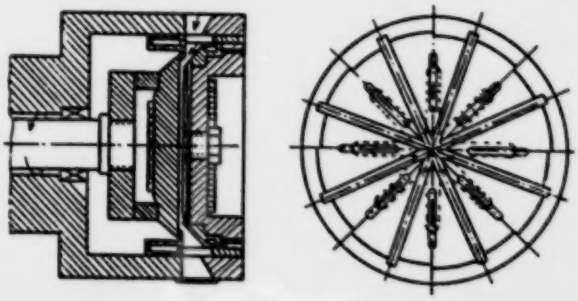


Schéma de l'extrudeuse à 4 vis

(5)



Extrudeuse à disque

COMPARAISON GENERALE

PVC EN POUDRE

EXTRUDEUSE - MONO VIS	EXTRUDEUSE BI -VIS
1 - RPM - HAUTE VITESSE	1 - RPM - BASSE VITESSE
2 - TEMPÉRATURE HAUTE 400 - 440°F	2 - TEMPÉRATURE - PLUS BASSE 360 - 390°F
3 - VIS - RAPPORT DE COMPRESSION 2.8 - 3.5	3 - 2 VIS 00
4 - % DE STABILISANT PLUS ÉLÉVÉ	4 - MOINS DE STABILISANT; UN PEU PLUS DE LUBRIFIANT
5 - HAUTE TEMPÉRATURE = PROBLÈMES TOLÉRANCE + GÉOMÉTRIE DU PRODUIT	5 - MEILLEUR CONTRÔLE DES ÉPAISSEURS - GÉOMÉTRIE
6 - DÉBIT DÉPEND DE LA GROSSEUR DE LA FILIÈRE	6 - SENSIBLE À LA DENSITÉ (BULK DENSITY) DE LA POUDRE PVC
7 - CONTRÔLE DE L'ÉPAISSEUR PLUS DIFFICILE	7 - DÉBIT DÉPEND DE L'ALIMENTATION DE LA POUDRE ET DE SA DENSITÉ

EXTRUSION DES TUYAUX PVC - DOUBLE VIS

AVANTAGES: RÉDUCTION - COÛTS DE PRODUCTION

A) PRODUCTION-HORAIRE : 6000 HRS/ANNÉE

DÉBIT: 700 LBS/HRS : 4 200 000 LBS TUYAUX PVC

SUR-POIDS DU TUYAU 5% VS 10% POUR UNE MONO-VIS

RÉCUPÉRATION : 5% : 210,000 LBS/ANNÉE

RÉCUPÉRATION À 30¢/LB: 63,000$/ANNÉE

B) RÉDUCTION DU COÛT DE FORMULATION DU COMPOUND PVC

1 À 3¢/LB

À 2¢/LB: 84,000$/ANNÉE

ECONOMIE BRUTE D'UNE MACHINE:

120 HR/SEMAINE X 50 SEMAINES

147,000$/ANNÉE

3. LIGNES D'EXTRUSION

Pour la fabrication en continu des produits semi-ouvrés d'un profil déterminé, il faut équiper l'extrudeuse d'un outillage qui se compose : d'une **tête-porte filière, d'une filière** (pièce conçue spécialement pour obtenir un profil déterminé), d'un **calibre refroidisseur** ou **conformateur** (composé d'un dispositif dans lequel certaines pièces sont adaptées au profil extrudé) et d'un **ensemble de réception.**

Le choix de l'extrudeuse dépend de la matière transformée et du débit qui est une fonction de la forme du profilé.

Le matériel qui compose la ligne d'extrusion dépend de la technique propre à chaque produit. Nous le présentons ci-dessous.

3-1. Extrusion de tubes.

3-1-1. Installation et équipement.

Une installation pour la fabrication des tubes rigides ou souples comprend les éléments suivants : extrudeuse, tête d'extrudeuse droite ou équerre, équipée d'une filière, appareil de calibrage, système de refroidissement, système de tirage, dispositif de sciage automatique à la longueur voulue (pour les tubes rigides), ou de bobinage (pour les tubes souples (fig. 1).

Comme équipement supplémentaire, la chaîne d'extrusion peut être équipée d'un appareil automatique de contrôle de l'épaisseur, d'un dispositif de marquage et d'un dispositif de stockage de tubes coupés.

La tête destinée à la fabrication de profils creux (fig. 2) tels que : tubes, tubes carrés ou rectangulaires, profils avec cloisons, etc., est munie de filières avec poinçon. Cet élément est centré par des ailettes dont l'une est perçée pour laisser l'air sous pression de 0,5 à 2 bars.

Le diamètre extérieur de la filière, le diamètre du poinçon, la longueur de la zone conique et cylindrique (entre les ailettes du poinçon et la sortie de la filière), dépendent du type de matière extrudée et doivent être fixés d'après les indications données par le fournisseur.

Dans le cas contraire, il faut arriver aux dimensions en ajustant la filière expérimentale en se servant des règles suivantes : le débit de la filière (à tube) pour un gradiant de pression donné, doit être à peu près proportionnel au diamètre moyen du tube, proportionnel au cube de l'épaisseur de la paroi, inversement proportionnel à la longueur de la zone cylindrique de la filière.

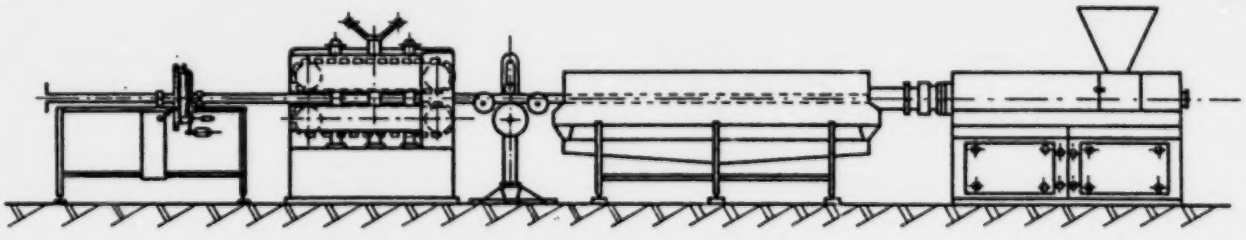
3-1-2. Réglage des dimensions de l'extrudat.

Pour que le profil qui sort de la filière ne se déforme pas immédiatement, on le soumet à traction ce qui contribue en partie au maintien de sa forme et de l'épaisseur des parois. L'effort de cette traction doit être ajusté à la vitesse de sortie du profil.

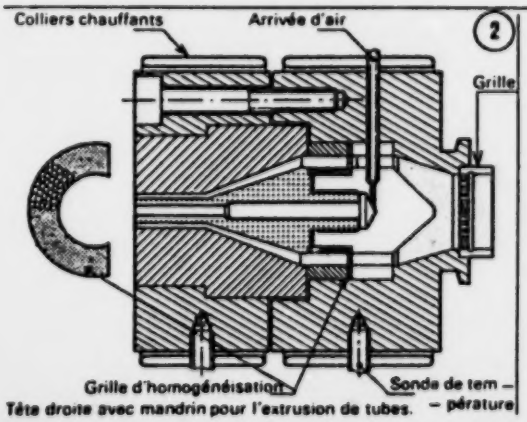
Ce rôle est exercé par le dispositif de tirage qui agit sur le profil refroidi et dont la vitesse est réglée et contrôlée avec précision. Le dispositif de tirage conditionne les dimensions du profilé et applique l'effort nécessaire au passage dans le conformateur.

Les tubes fabriqués par extrusion peuvent avoir des diamètres non conformés, ou calibrés à l'extérieur ou à l'intérieur.

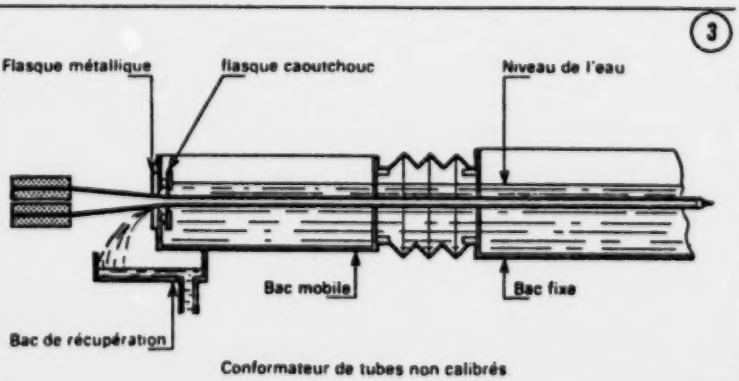
Les dimensions des tubes dits « non conformés » sont réglées par la vitesse de tirage et la vitesse de refroidissement (fig. 3). Les deux anneaux (le premier en métal et le deuxième en caoutchouc) ont des dimensions plus grandes que le tube. Cette méthode s'applique aux matières relativement rigides et aux petits diamètres.



Chaîne de fabication de tubes



Tête droite avec mandrin pour l'extrusion de tubes.



Conformateur de tubes non calibrés

Doc : ATO-CHIMIE

3-1-3. Conformation extérieure.

• Les tubes, à diamètres extérieurs calibrés, sont en général extrudés à l'aide de la tête droite.

• Il existe plusieurs types de conformateurs dans lesquels les parois encore chaudes et déformables sont plaquées contre les faces refroidies du calibreur par le vide, agissant de l'extérieur, ou par la pression de l'air à l'intérieur du tube.

• Un des systèmes, nommé « conformation en bac d'eau sous vide », est utilisé avec beaucoup de succès.
— Il se compose d'un long réservoir fermé, rempli aux deux tiers d'eau froide constamment renouvelée. L'air au-dessus de l'eau est maintenu sous dépression de quelques 300 Pa.
— Le tube extrudé est introduit à travers un orifice équipé d'un joint d'étanchéité dans les calibres alésés d'une série de plaques métalliques (fig. 1).

• Un autre système de conformateur-calibreur « à canal sec », est composé d'une série de compartiments entourant le canal central par lequel passe l'extrudat.
— Les uns sont refroidis par eau, les autres qui communiquent par des petits orifices avec le profil extrudé, se trouvent sous la dépression (fig. 2).
— A l'entrée du conformateur, l'extrudat est arrosé par l'eau ce qui le refroidit et facilite son avancement dans le canal central du conformateur.

• Une autre méthode utilisée depuis quelques dizaines d'aqnées utilise une surpression d'air dans le tube extrudé, fermé par un bouchon (retenu par une chaîne à l'intérieur du profil extrudé) [fig. 3].

3-1-4. Calibrage intérieur.

Le calibrage du diamètre intérieur du tube est plus difficile à réaliser. Il exige un système spécial sous forme d'un mandrin refroidi par eau (fig. 4).

Pour le calibrage interne l'utilisation de la tête équerre est recommandée.

3-1-5. Dispositifs de tirage.

Les dispositifs de tirage doivent être ajustés aux profilés extrudés. Pour les tubes on utilise le plus fréquemment les tireurs à chenilles (fig. 5). On rencontre les tireurs à deux ou à trois séries de rouleaux. Ces derniers assurent une bonne conformation de la linéarité de l'extrudat. Les sabots des chenilles sont réalisés en caoutchouc ce qui assure un bon entraînement.

Le dispositif de tirage le plus simple peut être réalisé sous forme d'un tapis, sur lequel repose le profilé. L'effet d'entraînement peut être amélioré par quelques galets presseurs.

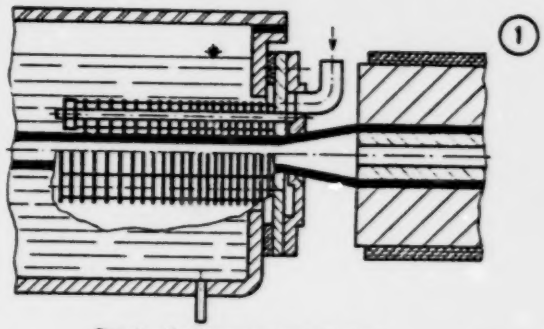
3-1-6. Réception de l'extrudat.

Les tubes rigides sont sciés à la longueur désirée. En général la scie circulaire suit le profilé dans son mouvement d'avance et pour cela est entraînée par le profilé lui-même. Commandée automatiquement par un contacteur électrique, elle coupe le tube, et recule à la position du départ.

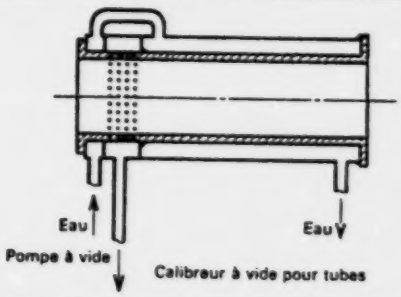
Plusieurs autres systèmes trouvent ici leur application et dépendent en général de la taille et de la consistance du tube extrudé.

Les tubes souples sont dans la plupart des cas enroulés sur des bobines dont la rotation est liée à la vitesse de tirage.

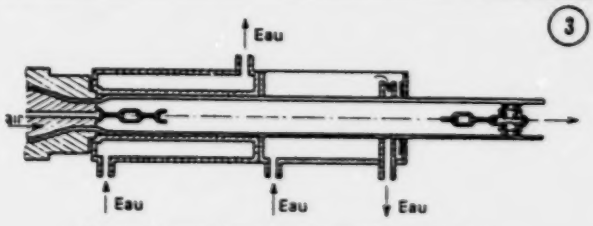
Les appareils automatiques de mesure en continu de l'épaisseur de la paroi sont coûteux et installés à la demande de transformateur. La mesure est réalisée par rétrodiffusion bêta et gamma ou par ultrasons.



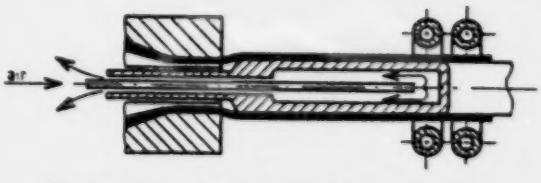
Bac de refroidissement avec calibreur à plusieurs disques. Doc. BAYER



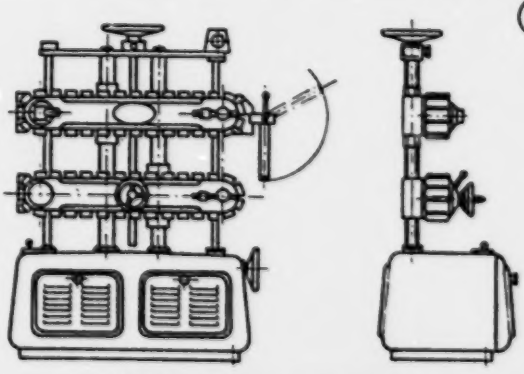
Calibreur à vide pour tubes



Calibreur à pression interne et refroidissement à eau



Calibreur à mandrin — Refroidissement interne et externe



Chenilles de tirage pour extrudeuses

3-2. Extrusion de profilés creux.

En général l'équipement de la chaîne d'extrusion diffère peu de la ligne de production de tubes à sections circulaires.

Les tubes carrés ou rectangles, les profils creux avec cloisons, tels que par ex. les lames de volets, les gaines, etc. exigent des filières soigneusement adaptées à la forme de l'extrudat, surtout dans le cas de profils dissymétriques dont les parois ont des épaisseurs différentes (fig. 1).

La conformation et le calibrage sont faits à l'aide du dispositif « à canal sec » — l'utilisation du conformateur « en bac d'eau sous vide » est impossible.

Le tirage réalisé à l'aide d'un tireur à chenilles donne pleine satisfaction.

3-3. Extrusion de profilés pleins, de joncs et de profilés à sections diverses.

Pour cette catégorie de produits on utilise une tête d'extrusion droite et une filière sans poinçon. Les profils ouverts, pas très épais exigent des guides supplémentaires pour éviter la déformation des bords.

Si une section de ce type de profilé présente un déséquilibre de masse, un soin particulier doit être apporté à la conception de la filière pour obtenir les cotes correctes et l'absence de contraintes après le refroidissement.

En général on exécute plusieurs morceaux (commodité de réalisation) en commençant par façonner la section du profilé bien profond dans le corps de la filière pour obtenir la vitesse d'écoulement la plus régulière possible sur toute la périphérie de la section.

La mise au point de la filière se fait par retouches et par essais successifs.

La conformation s'effectue par calibrage au niveau du bac de refroidissement.

Les profils pleins et irréguliers présentent des difficultés non seulement au niveau du dessin de la filière, mais aussi au niveau du comportement thermique des matières extrudées. La mauvaise conduction de la chaleur s'oppose à un refroidissement rapide et efficace pendant la fabrication de profilés.

Cependant on arrive à la forme correcte des profilés en jouant sur la vitesse de tirage, en accord avec le chauffage au niveau de l'extrudeuse et de la tête ; sur la conformation et sur les retouches de la filière.

3-4. Extrusion de plaques et de feuilles.

Les profilés très plats et larges sont considérés comme des plaques ou feuilles et leur production par extrusion est courante dans l'industrie.

Un produit rigide d'épaisseur supérieure à 0,5 mm et généralement coupé en longueur porte le nom de « plaques », tandis qu'un produit souple ou semi-rigide, d'épaisseur inférieure à 0,25 mm, qui peut être enroulé sur une bobine, est appelé « feuille ».

L'extrusion de ces articles exige un équipement spécial pour ce qui concerne la tête, la filière et les dispositifs de réception.

3-4-1. Tête-filière plate.

C'est l'élément principal de l'équipement d'une chaîne de production de plaques et de feuilles.

La tête et la filière forment dans ce cas un ensemble différent de celui utilisé pour l'extrusion de tubes ou de toutes sortes de profils. Elles se composent d'un large bloc très robuste, dans lequel la matière provenant du cylindre de la machine entre et se répartit dans le canal nommé « distributeur » situé transversalement à l'axe de l'extrudeuse (fig. 2).

La régularité du débit est obtenue par la pression d'une barre d'étranglement (B) déformable à l'aide de boulons.

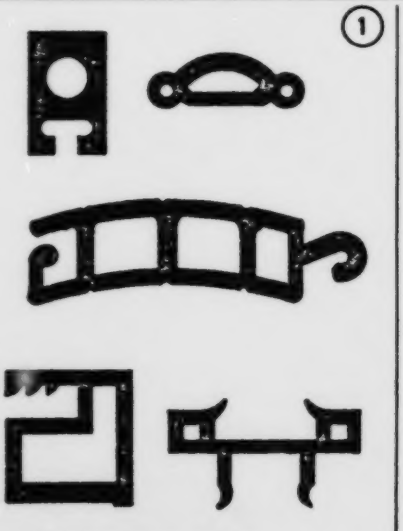
Dans le cas des matières fluides le distributeur alimente directement la filière, mais pour les matières plus visqueuses le canal qui alimente celle-ci a la forme d'une queue de poisson « ou d'un porte-manteau » (fig. 3).

Ce passage progressif entre le cylindre et la filière est nécessaire pour que la matière sorte avec la même vitesse sur toute la largeur.

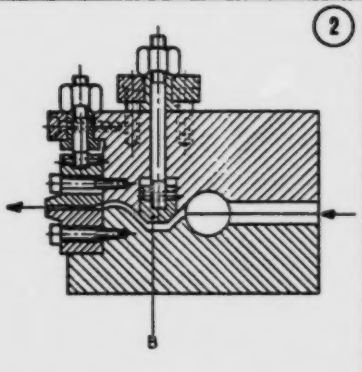
La largeur des feuilles et des plaques extrudées dépend du débit de la machine et dépasse souvent 3 m.

La tête plate peut extruder horizontalement ou verticalement ceci dépend de l'épaisseur de l'article fabriqué. Pour les feuilles souples elle est en général verticale et horizontale pour les plaques.

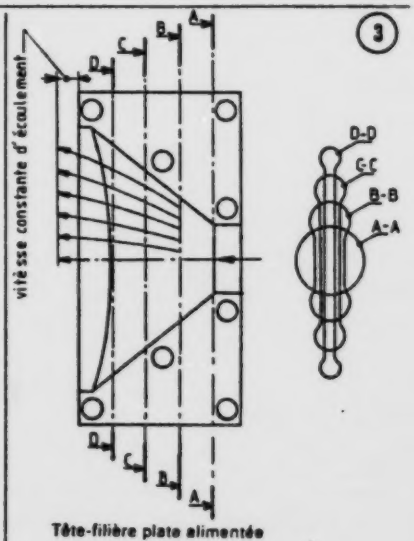
Le fonctionnement correct de la tête plate dépend en grande partie de la régulation de température dans les différentes zones de l'outillage.



Profilés creux non circulaires



Tête-filière plate horizontale



Tête-filière plate alimentée par canal « porte manteau »

3-4-2. Calibrage et réception de l'extrudat.

A la sortie de la filière l'extrudat est introduit entre les cylindres de la calandre, refroidi avant d'être tiré, et coupé (fig. 1).

Dans le cas de matières souples ou de feuiles minces, on les stocke par bobinage en rouleaux.

La tête plate peut extruder vers le bas et le refroidissement est obtenu grâce au contact avec un tambour dans lequel circule de l'eau froide (fig. 2). Le calibrage dépend de la vitesse de dispositif de tirage (f) composé de deux rouleaux recouverts de caoutchouc.

Le calibrage de l'épaisseur des plaques est obtenu grâce au passage de l'extrudat entre plusieurs rouleaux refroidisseurs. On intensifie le refroidissement en soufflant de l'air par les buses spéciales au niveau du rouleau.

Le mécanisme de tirage est composé de deux rouleaux caoutchoutés. Après le tirage, la plaque est coupée avec une cisaille automatique et la feuille peut être bobinée ou découpée.

3-5. Couchage et plaxage[1].

La technique de couchage du film plastique sur un support par exemple de papier, est assez semblable à celle de la fabrication des feuilles.

Elle consiste à répartir un film de plastique fondu sur toute la largeur du support qui défile sous la filière de l'extrudeuse. L'adhésion du film plastique au support est assurée par la pression de deux rouleaux entre lesquels passe l'extrudat et la bande-support. On applique le couchage sur différents types de papier et de carton, sur des tissus, sur des films cellulosiques ou sur de l'aluminium en feuille.

Sur la figure 3, nous présentons le principe de l'extrusion-couchage. Dans la plupart des cas, l'extrudeuse est équipée d'une tête-filière plate, qui débite vers le bas, et dont la longueur est parallèle à l'axe de la machine (fig. 3).

Le support, par exemple le papier (fig. 3) se déroule de la bobine (2) et passe entre le rouleau (3) et le rouleau-tambour (4) où il est recouvert par le film chaud, sortant de la tête de l'extrudeuse. Le premier rouleau est recouvert de caoutchouc et le tambour de laminage (4) est en acier, poli et chromé.

La température de surface de ce dernier est régulée grâce à un circuit d'eau. La matière, en général plus chaude que dans le cas de l'extrusion normale doit toucher le support avant de passer entre les rouleaux, d'où la nécessité d'un réglage précis de la géométrie de l'ensemble.

Il existe des chaînes qui permettent d'excentrer le couchage de deux côtés du support — nous présentons un exemple sur la figure 4.

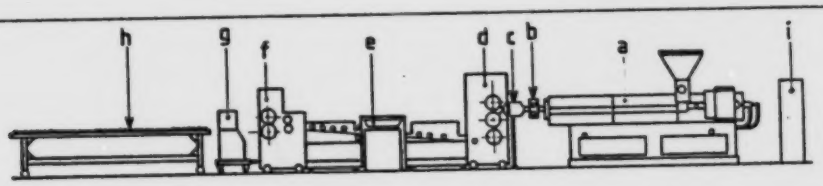
Les deux techniques, l'extrusion de feuilles et le couchage, peuvent être combinées pour fabriquer les feuilles et les plaques « sandwich », recouvertes d'un côté ou des deux par un film.

En général, la couche extérieure présente certains avantages techniques ou d'aspect par rapport à la couche intérieure. Elle peut, par exemple, être plus brillante, plus dure ou représenter un dessin.

Mais le film fixé en surface doit avoir une bonne compatibilité avec le support, par exemple : PS brillant (dur) — PS choc, ou PVC rigide — PVC plastifié etc.

Sur la figure 5, nous présentons le schéma d'une chaîne de fabrication de panneaux plaqués.

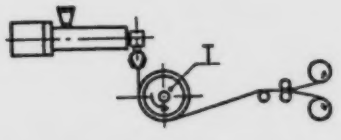
1 Le terme « plaxage » se rapporte à la technique analogue appliquée au support rigide et semi-rigide par exemple des plaques.



1

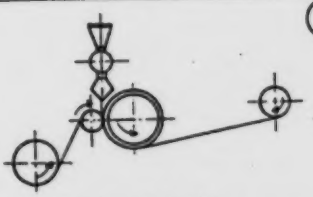
a — extrudeuse
b — filtre
c — tête-filière
d — calandre
e — pupitre de commande
f — dispositif de tirage
g — scie automatique
h — stockage des plaques
i — armoire de commande

Chaîne de production de plaques extrudées. (Doc : BAYER)



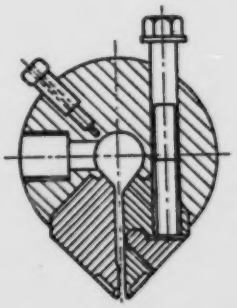
2

T — Tambour de refroidissement



3

Couchage du papier



4

Tête plate-extrudente vers le bas

5

Chaîne de production de panneaux plaqués (plaxage)

a — film
b — feuille extrudée

3-8. Co-extrusion.

3-8-1. Principe de la méthode.

C'est une technique de fabrication d'un **extrudat** dont la section se compose de **zones ou de couches de différentes matières,** qui, étant extrudées simultanément, donnent une excellente homogénéité mécanique.

On peut co-extruder des profilés, des tubes, on peut recouvrir des câbles avec plusieurs couches de matières différentes et de différentes couleurs ; on produit par extrusion-soufflage des objets creux composés de plusieurs couches, ou on extrude des feuilles et des films multicouches par extrusion-gonflage.

Cette technique permet de fabriquer des éléments dont une partie de section se compose par exemple de la même matière mais plastifiée (fig. 1), ce qui est utilisé dans les profilés-joints pour les bâtiments.

Elle permet de produire par exemple des tuyaux multicolores ou multicouches pour des raisons techniques ; la couche extérieure ayant la résistance mécanique et la couche intérieure la résistance chimique.

Dans le domaine de la fabrication des feuilles et des films, elle permet de composer les différentes couches d'après les qualités des matières choisies, par exemple, à l'extérieur, une couche résistant à l'abrasion et à l'intérieur une couche étanche.

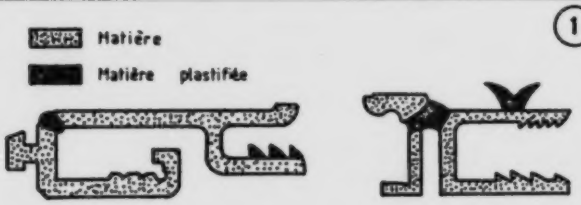
On applique la co-extrusion de la même matière (par ex. film dans lequel on réduit le risque de micro-trous par la superposition de deux couches) ou on co-extrude des couches de matières différentes ; celles-ci doivent être compatibles entre elles pour assurer la résistance contre la délamination.

Cette **compatibilité doit être triple : physico-chimique,** concernant les matières extrudées, **rhéologique à l'état fondu** — ce qui conditionne un écoulement de ces matières dans la filière, et **physique** dans la gamme de températures d'utilisation de l'extrudat (par ex. il ne serait souhaitable d'avoir une grande différence du coefficient de dilatation thermique ou le gonflement d'un des composants sous l'effet d'humidité).

3-8-2. Technique de la co-extrusion.

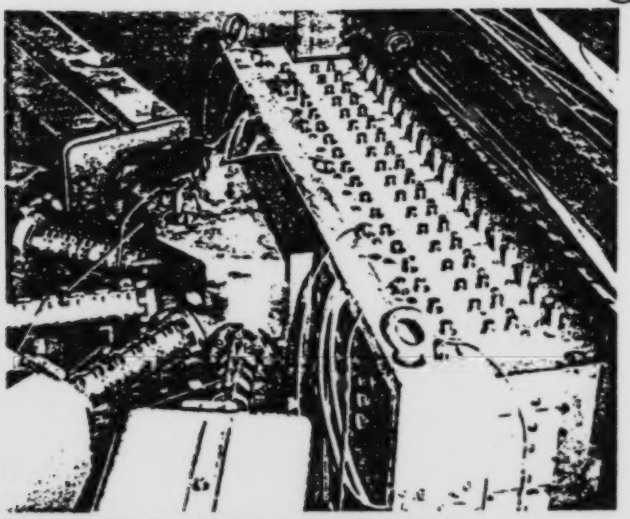
La co-extrusion poly-matière exige autant d'extrudeuses que de matières qu'on veut incorporer dans le même extrudat. La photo de la figure 2 explique leur fonctionnement.

La tête pour la co-extrusion est alimentée par les flux des matières provenant d'extrudeuses différentes. La figure 3 représente un exemple de tête-équerre pour la co-extrusion d'un film gonflé et la figure 4 représente la tête utilisée pour la co-extrusion de tubes.



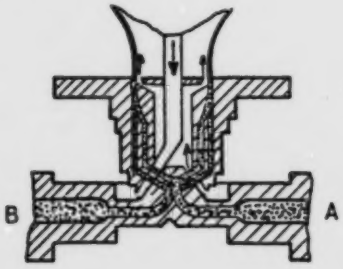
1

Exemple de profilés composés de la même matière : rigide et plastifiée.



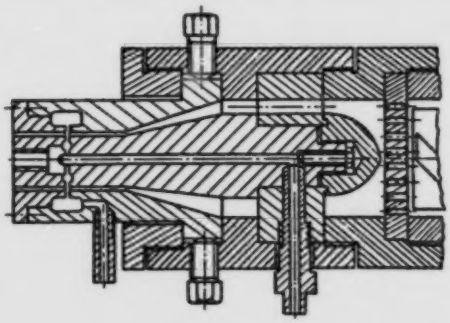
2

Fig. 2 — Alimentation de la tête co-extrusion poly-matière.
Photo EMS Industrie



3

Tête d'équerre pour co-extrusion (schéma)



4

Tête pour co-extrusion de tubes.

3-8-3. Variantes techniques.

Dans le cas de filières plates pour extrusion, il y a deux systèmes : à distributeur laminaire et à canaux de distribution.

Le premier consiste en l'introduction tangentielle d'une ou de plusieurs veines de matières plastifiées dans le flux central de la matière qui forme le cœur du profilé extrudé (fig. 1).

Le deuxième est composé d'une filière alimentée directement par les canaux distributeurs. La rencontre de deux ou de plusieurs couches a lieu juste au point de sortie (fig. 2).

Les têtes-filières annulaires pour co-extrusion peuvent être du type poly-matière (fig. 3) ou du type mono-matière (fig. 4).

3-9. Extrusion d'allégés.

3-9-1. Généralités.

Les profilés, les plaques et les feuilles extrudés en matières allégées présentent actuellement un intérêt croissant sur le marché des produits en matières plastiques.

Ces produits ont des avantages techniques considérables et sont plus économiques que les éléments fabriqués en matières classiques, compte tenu de leur poids réduit pour des qualités mécaniques presque identiques.

L'extrusion d'allégés est une technique récente. Elle fut maîtrisée d'une part grâce aux efforts des fabricants qui fournissent des matières premières adéquates et d'autre part des constructeurs de machines adaptées à cette technique de mise en œuvre.

3-9-2. Technique d'extrusion d'allégés.

La structure cellulaire de matériaux allégés est obtenue par l'incorporation à la matière plastique de base d'un agent qui, au moment de la transformation, sous l'action de la chaleur, se transforme en petite bulle de gaz ou de vapeur.

Il existe une autre méthode (appelée « injection directe ») qui consiste à introduire un gaz sous pression, directement dans la matière malaxée dans une extrudeuse. La température de ce mélange est diminuée progressivement pendant qu'il est transféré vers la filière pour être extrudé. Cette technique exige des extrudeuses spéciales, souvent à deux vis en tandem.

Le taux d'expansion dépend du produit chimique incorporé à la matière première et du traitement de l'extrudat au moment de l'extrusion.

En général ce taux pour les agents d'expansion qui dégagent du gaz (dans la plupart des cas, de l'azote) varie de 2 à 4. Les produits chimiques qui se vaporisent permettent d'augmenter ce taux jusqu'à 12.

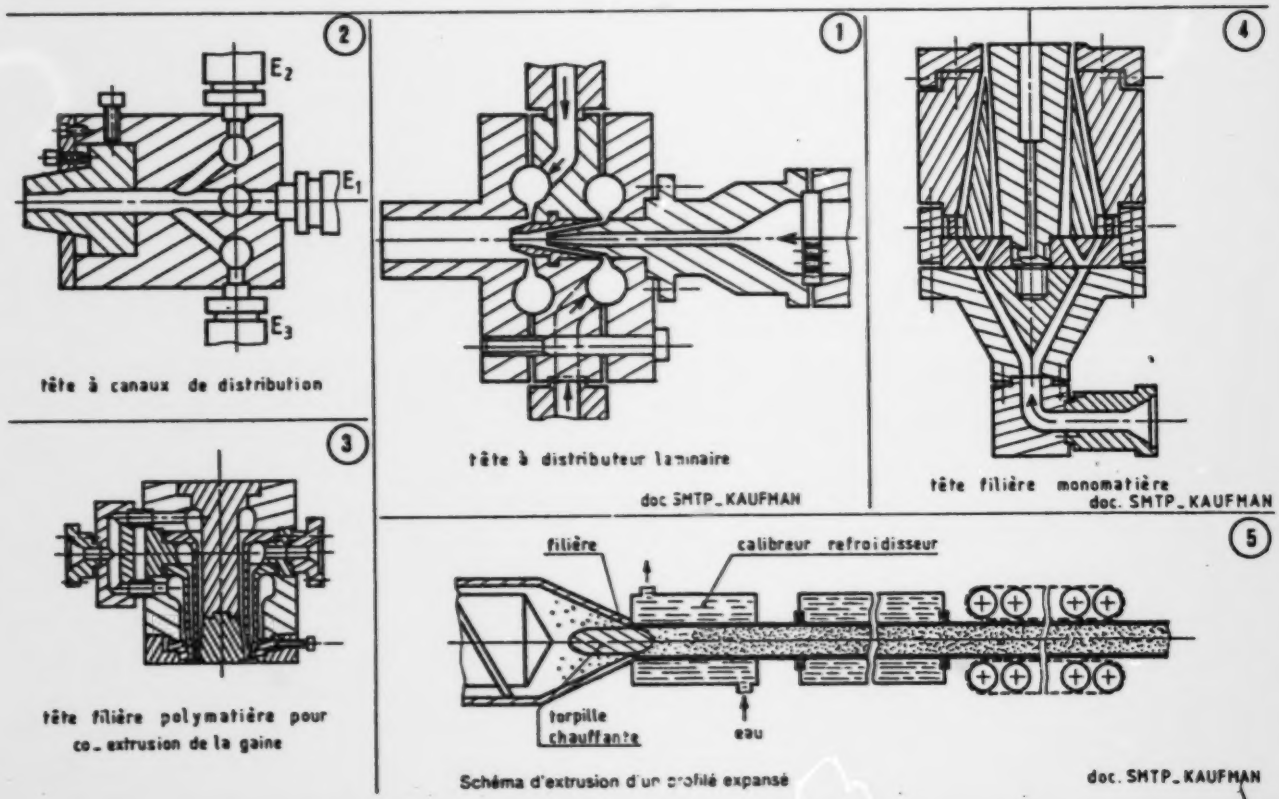
Le taux d'expansion est réglé par le refroidissement de l'extrudat à la sortie de la filière. La matière contenant l'agent d'expansion est maintenue à une température et une pression qui ne permettent pas aux gaz de s'expanser.

Au moment du passage par les derniers filets de la vis et la filière, la température augmente, la pression tombe et le dégagement de bulles de gaz commence.

Immédiatement à sa sortie de filière, la matière passe par le calibreur-refroidisseur qui arrête le dégagement de bulles de gaz à la surface du profilé (fig. 5).

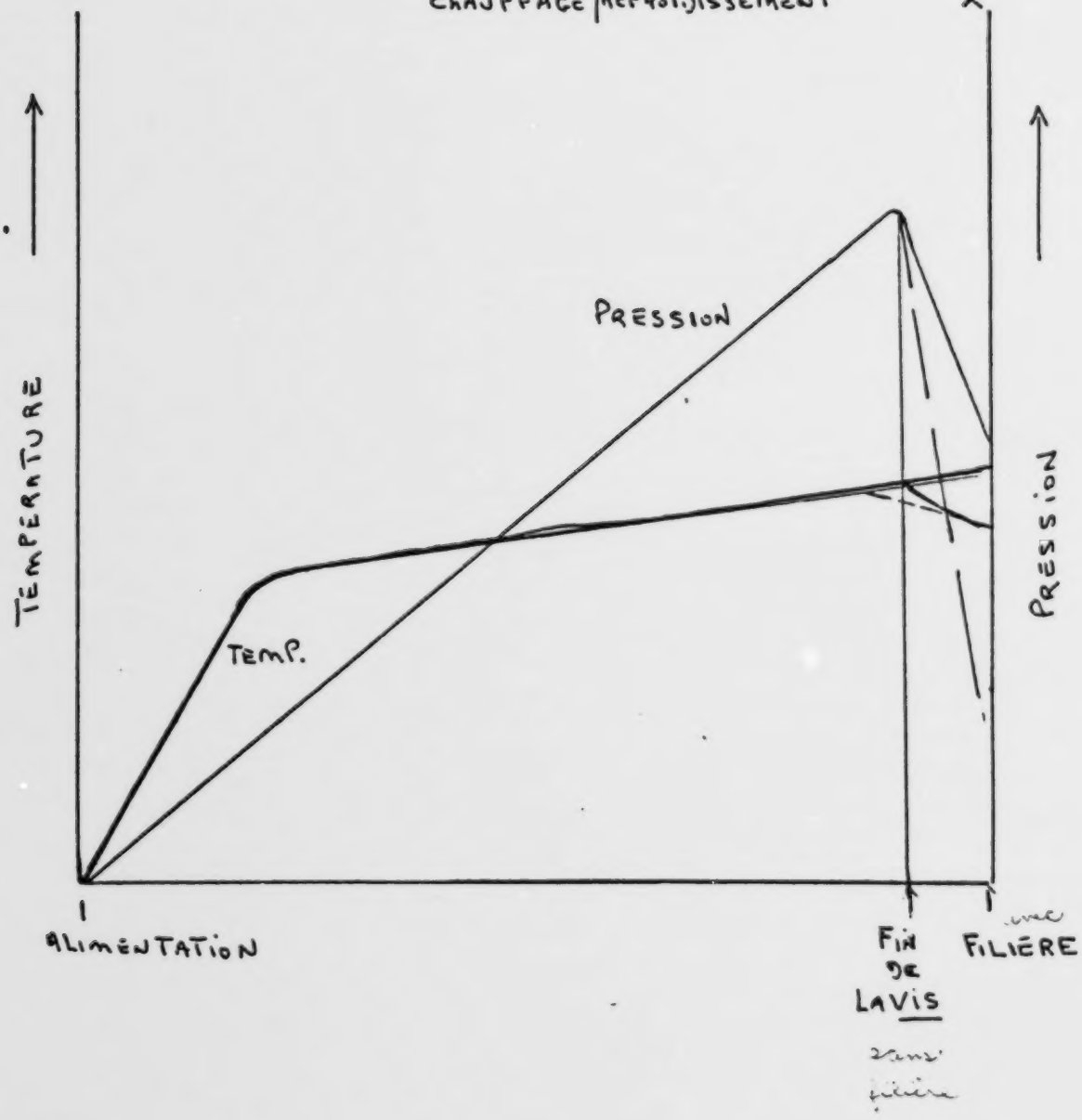
La conductibilité thermique d'une matière expansée est très mauvaise et le procédé de refroidissement est lent, ce qui oblige l'application de base de refroidissement long.

Une régulation précise de la température et de la vitesse est indispensable.



FACTEURS -

	PRESSION	TEMP.
RÉSINE	x	x
VIS	x	x
VITESSE-VIS	x	x
TAMIS (ÉCRANS)	x	
PLAQUE PERFORÉE	x	
FILIÈRE	x	x
CHAUFFAGE / REFROIDISSEMENT		x



QUELLE EXTRUDEUSE CHOISIR?

AVANT DE PRENDRE UNE DECISION, POSEZ-VOUS LES QUESTIONS SUIVANTES

QUELLE MATIERE ?

Quelles matière ou matières plastiques seront extrudées ?
C'est la question de base !

C'est la matière qui détermine :
- le dessin et la géométrie de la vis d'extrusion,
- la gamme de vitesse et surtout la vitesse maxima de la vis avec laquelle la matière peut être extrudée, et
- les dimensions du réducteur qui sont fonction du couple demandé par la ou les matières à extruder.

Les Extrudeuses KAUFMAN du **même diamètre de vis** peuvent être livrées avec des **réducteurs différents, capables de transmettre la puissance d'entraînement totale,** même à des vitesses de vis lentes (couple élevé), et ceci avec un facteur de sécurité important, garantissant une longue durée de vie des engrenages. Chaque modèle de réducteur est équipé **d'engrenages interchangeables.** Ceci permet le choix le plus favorable de la gamme de vitesse de la vis suivant la matière utilisée.

QUELLE PRODUCTION HORAIRE ?

QUEL PRODUIT EXTRUDE ?

Il est rationnel de réduire la production mensuelle ou annuelle en production kg/heure

Ceci permet une adaptation facile aux horaires de production désirés, c'est-à-dire opération en 1, 2 ou 3 postes pendant 5, 6 ou 7 jours par semaine.

Il est aussi nécessaire de déterminer clairement le ou les produits à extruder en considérant leurs poids et leurs sections en mm^2 Ceci influence le choix des têtes d'outillage et les possibilités de calibrage et de refroidissement.

QUELLES POSSIBILITES DE CALIBRAGE ET DE REFROIDISSEMENT ?

QUELLE GAMME DE VITESSE POUR LES APPAREILS DE RECEPTION ?

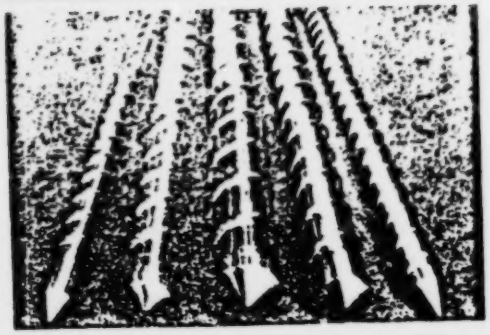
En général, la limitation ultime de la production horaire dans l'extrusion est la possibilité de calibrage et de refroidissement du produit.

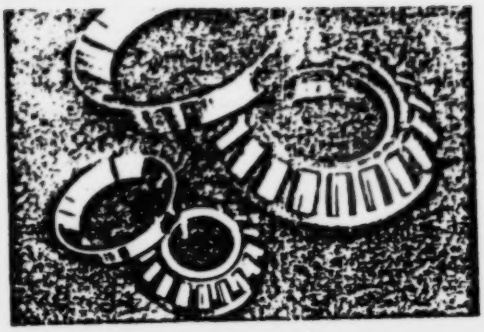
De grands progrès ont été faits pour développer des techniques efficaces de calibrage et de refroidissement pour suivre la capacité de production toujours croissante des extrudeuses modernes.

Il faut tenir compte du fait, que même deux sections égales, mais de géométrie différente, peuvent demander des dispositifs et des longueurs de refroidissement très différents.

La vitesse linéaire élevée d'un produit à paroi mince demande une longueur de refroidissement plus grande, alors que la même section à paroi épaisse, malgré la vitesse linéaire réduite, demandera une attention particulière pour que le refroidissement se fasse aussi uniformément que possible. Ce n'est pas toujours facile à cause des caractéristiques thermiques des matières plastiques.

En tous cas, il faut s'assurer que la production demandée en kg/heure de produits de différentes géométries et sections peut être calibrée et refroidie à la cadence voulue.





QUEL DIAMETRE DE VIS ?

QUELLE PUISSANCE D'ENTRAINEMENT ?

La capacité de production d'une extrudeuse pour matières plastiques est déterminée par la puissance du moteur d'entrainement et non par le diamètre de la vis de l'extrudeuse.

En effet, une extrudeuse d'un diamètre de vis de 150 mm. équipée d'un moteur de 75 ch ne peut en aucun cas produire plus qu'une extrudeuse de 90 mm avec la même puissance d'entraînement de 75 ch.

Pourquoi construit-on des machines de différents diamètres de vis si c'est la puissance d'entraînement qui détermine la capacité de production de l'extrudeuse ?

La réponse est simple :

La puissance d'entrainement maxima que l'on peut transmettre, **est limitée par la section la plus faible de la vis** d'extrusion.

Pour une puissance (couple) accrue il faut avoir des sections de métal suffisamment grandes pour transmettre cette puissance aussi bien dans la vis, que dans le réducteur et l'arbre de butée. Ceci est accompli en construisant une machine à diamètre de vis plus grand.

On rencontre fréquemment des machines de diamètre égal à des prix très différents. Ceci s'explique du fait que l'extrudeuse A, construite pour une puissance d'entraînement de 75 ch et pour une durée de vie de 30 000 heures a des éléments de construction beaucoup plus robustes que l'extrudeuse B du même diamètre qui est construite pour 50 ch et 10 000 heures de durée de vie. L'extrudeuse A a une capacité de production de 50 % plus grande et une durée de vie trois fois plus longue.

QUELLE BUTEE ?

Il est encore à considérer que la butée doit être adaptée aux pressions d'extrusion prévues pour éviter une durée de vie trop courte. Exemple pratique : Une butée choisie pour une pression d'extrusion moyenne de 350 kg/cm2 et une durée de vie de 30 000 heures, aura une durée de vie de 3 000 heures seulement avec une pression d'extrusion de 700 kg/cm2.

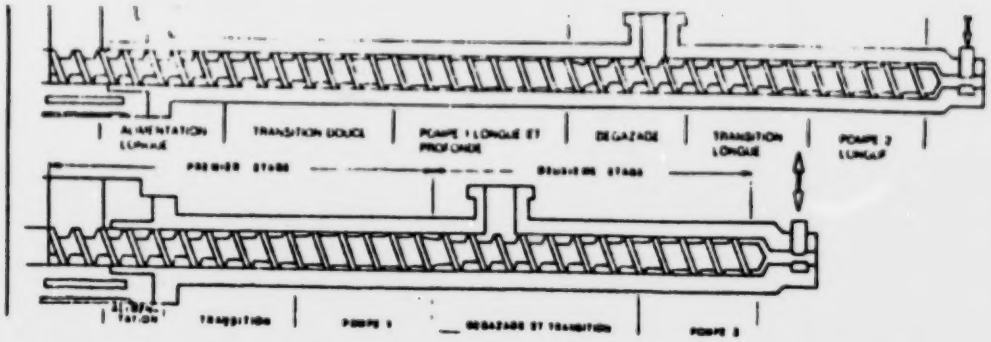
En doublant la pression, on réduit la vie d'une butée au dixième.

En plus de la pression d'extrusion, il faut considérer que les tolérances mécaniques d'usinage causent des pressions non uniformes sur les différents rouleaux de la butée.

C'est pour cette raison que les Extrudeuses KAUFMAN sont équipées d'une **butée à auto-alignement,** qui garantit à tout instant **une pression uniforme sur tous les rouleaux** du roulement, ce qui n'est pas obtenu avec d'autres modèles de butées.

33 D

24 D



QUEL RAPPORT L/D ?

Au cours des dernières années, les extrudeuses monovis modernes sont devenues plus longues. Aujourd'hui les machines les plus courtes ont une longueur de vis de 20 D mais on trouve fréquemment des rapports L/D plus longs, allant **de 24 à 33 D.**

Les machines plus longues ont des avantages incontestables. Elles permettent une transition de température de la matière plastique plus douce et plus uniforme de la température ambiante à la température de fusion. Il en résulte une température de matière finale plus basse et une **alimentation** de la section de pompage de la vis plus régulière. La longueur plus grande permet également de faire des sections de pompage de la vis plus longues et moins sensibles dans leur performance à des contre-pressions de tête et filière. En conséquence, **la régularité et la précision sont plus grandes.**

L'extrudeuse longue permet également d'utiliser des vis d'extrusion **à 2 étages.**

Cette conception de vis comporte 2 vis consécutives, usinées d'une seule pièce.

La première section de cette vis comporte la zone d'alimentation, la transition de fusion et la première pompe. Celle-ci décharge sans aucune contre-pression dans l'entrée de la deuxième section de la vis. Le profil de cette section de vis est profond et accepte en général 3 à 6 fois le volume de la première section de pompage. C'est dans cette zone à profil profond que peut se faire le dégazage de la matière en fusion. Ensuite, la masse uniformément fondue, entre par une zone de transition dans la 2e section de pompage.

Celle-ci a la tâche de pomper la matière plastique uniformément contre les pressions engendrées par les têtes et filières. Les différentes contre-pressions — résultant des têtes et filières de différentes sections, — sont compensées par un mécanisme de valve qui permet d'équilibrer parfaitement le débit de la première vis (à décharge ouverte) avec le débit de la deuxième vis (conçue pour opération contre les pressions de tête).

Le grand avantage de ce système de vis :

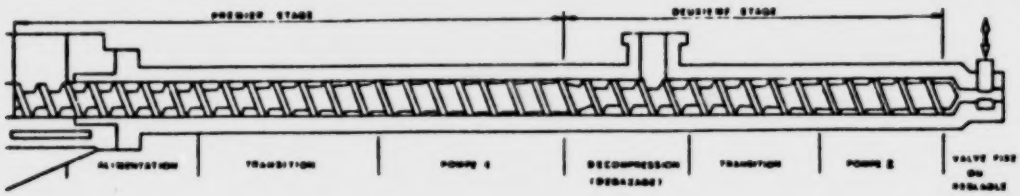
l'action de fusion de la matière est complètement séparée de l'action de pompage.

En plus, on peut dégazer la matière en fusion, ce qui s'impose pour beaucoup de produits. Le dégazage à chaud retire l'air entraîné dans l'alimentation aussi bien que l'humidité et les composants volatils qui se trouvent dans beaucoup de matières et qui doivent être enlevés à chaud.

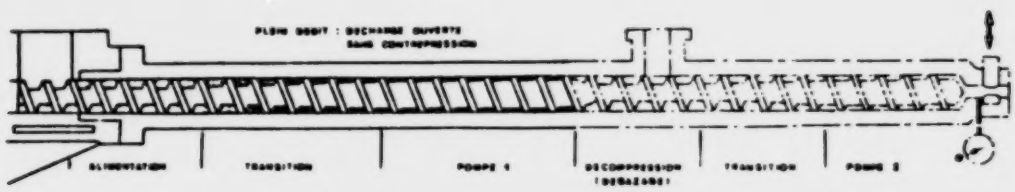
Il est également un fait, que l'extrudeuse à dégazage est plus économique et plus simple en installation et en opération que les extrudeuses avec des trémies sous vide ou des appareils à pré-chauffage.

Les vis à 2 étages peuvent être utilisées aussi bien avec dégazage que sans dégazage. Elles donnent toujours une plus grande précision d'extrusion et leur débit volumétrique est toujours le même et peut être facilement calculé et contrôlé.

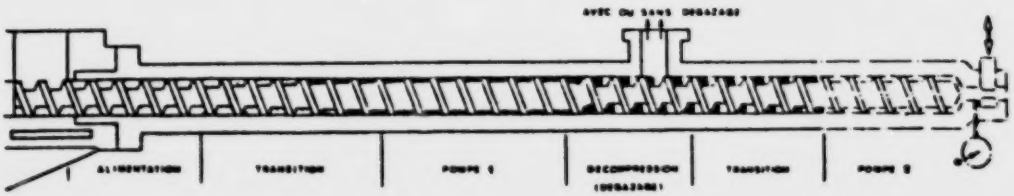
LES VIS A DEUX ETAGES



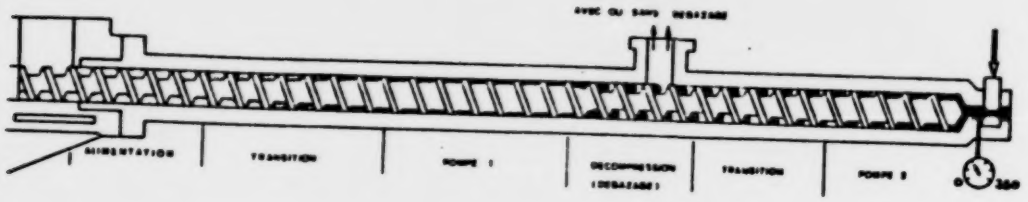
La vis à deux étages est en fait deux vis consécutives d'un seul tenant qui sont séparées par une zone de décompression (dégazage). Une valve fixe ou ajustable est située entre la deuxième vis et la filière.



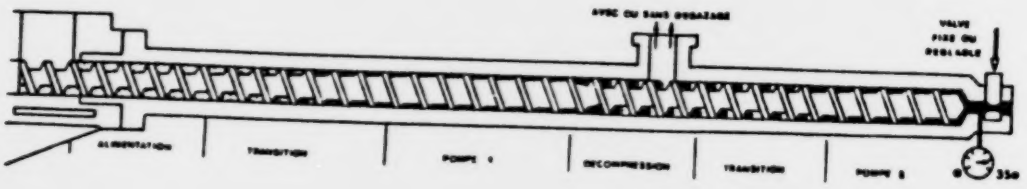
La matière sort de la pompe I complètement plastifiée et uniforme. Il n'y a aucune contrepression du côté décharge. Par conséquent, le débit est élevé et non freiné. Il dépend uniquement de la vitesse de la vis et de sa profondeur.



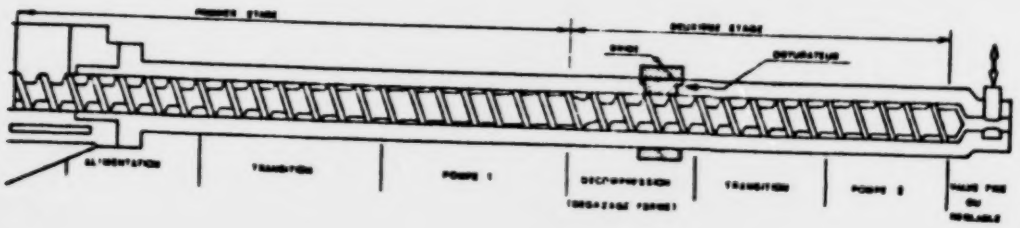
La matière entre dans la zone de décompression (dégazage). Cette zone n'a aucune pression hydrostatique car le profil de la vis dans cette zone est plus profond que celui de la pompe I. La matière (en fusion) remplit donc seulement une partie du canal de la vis permettant l'évacuation des vapeurs tout le long de cette zone. L'ouverture dans le cylindre maintient cette section à la pression atmosphérique ou sous vide. La matière est également bien mélangée dans cette zone, ceci à un taux de cisaillement très bas.



La matière en fusion est maintenant forcée par la pompe 2 à travers la valve et la filière. Cette pompe est conçue pour une capacité telle qu'elle serait seulement partiellement remplie s'il n'y avait pas la résistance de la valve et de la filière. La contrepression (réglable) détermine le remplissage de la pompe 2.



Lorsque la pompe 2 est remplie sur toute sa longueur, elle est peu sensible aux variations de contrepressions. La valve, fixe ou ajustable, est essentielle pour que la pompe 2 soit toujours bien remplie. Cette valve permet également d'équilibrer les deux étages de la vis avec des polymères de viscosités différentes.



Pour certaines matières, il est recommandé d'utiliser la vis à deux étages sans dégazage, ce qui se fait aisément en remplaçant la cheminée de dégazage par notre obturateur et sa bride. Les vis à deux étages garantissent une meilleure homogénéisation, une régularité plus grande et une amélioration du rendement par rapport aux vis simple étage.

LA CONCEPTION MECANIQUE DES EXTRUDEUSES KAUFMAN

La conception des Extrudeuses KAUFMAN est basée sur une longue expérience d'extrusion des matières plastiques. Ce sont des extrudeuses très robustes et tous les éléments de ces machines sont de la meilleure qualité possible avec **d'importants facteurs de sécurité.**

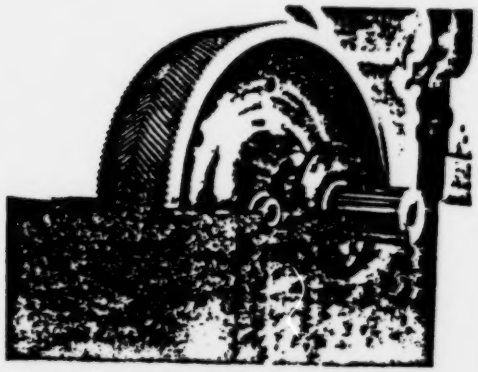
Leur conception mécanique garantit :

- Longue durée de vie
- Fonctionnement sans pannes
- Accès facile à tous les éléments de la machine
- Encombrement réduit pour leur capacité de production.

LE BATI est construit de plaques d'acier cambrées, soudées à l'arc électrique. Sur ce bâti robuste sont montés : le moteur d'entraînement, le réducteur avec le groupe d'alimentation-butée et le support frontal du cylindre. Egalement, sont montés sur demande, la pompe à vide pour le dégazage et un système autonome de refroidissement du cylindre.

Le bâti contient aussi le câblage électrique complet de la machine.

LE REDUCTEUR à denture à chevrons, fonctionne silencieusement. Son important facteur de sécurité lui garantit une longue vie, sans entretien.



Un jeu **d'engrenages interchangeables** permet le changement facile du rapport de réduction, pour adapter la gamme de vitesse de la vis aux différentes matières, tout en utilisant la puissance totale de l'entraînement.

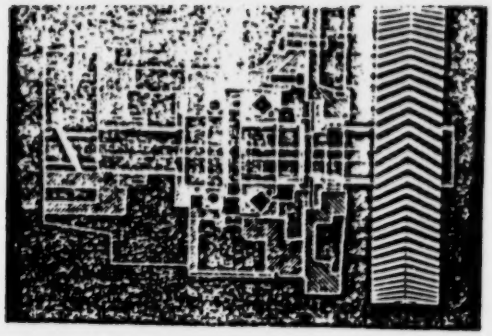
LE GROUPE BUTEE est largement dimensionné. Il comporte un axe d'entraînement et d'accouplement avec un **roulement à rotule à rouleaux sphériques** entre des roulements à charge radiale. Cette conception assure à tout moment, **l'auto-alignement parfait de la butée.**

L'auto-alignement compense pour des dilatations thermiques différentielles et des tolérances de fabrication et maintient une charge uniforme sur tous les rouleaux du roulement à tout instant, ce qui n'est pas obtenu avec d'autres modèles de butées.

Ceci est très important, car **en doublant la pression sur un roulement sa durée de vie est réduite au dixième.**

La lubrification du groupe se fait par immersion partielle des roulements dans un réservoir d'huile spécialement conçu. En opération, les roulements par leur action de turbine, entraînent l'huile du réservoir et la font circuler. Le groupe butée est protégé contre la poussière et la matière plastique par des **bagues d'étanchéité et un joint labyrinthe.**

Le groupe d'alimentation a une large **ouverture rectangulaire** qui facilite l'entrée de la matière plastique. Il est muni d'une double enveloppe permettant la cirulation du liquide de refroidissement.



Un **joint chauffant** est monté à l'arrière du groupe d'alimentation pour éviter les fuites de polymères même en poudres très fines. La température de ce joint est réglable.
La butée est isolée thermiquement du groupe d'alimentation.

LE CYLINDRE, en acier allié à haute résistance, a un **revêtement intérieur en XALOY** de 2 mm d'épaisseur. La dureté ROCKWELL de ce revêtement est de C 55/58. XALOY à base de Boron est renommé par sa **résistance extraordinaire à l'usure.**

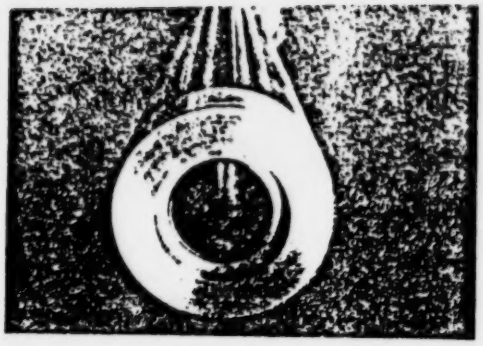
Le chauffage du cylindre est effectué par des **résistances électriques tubulaires isolées à la céramique** et encastrées dans des colliers en aluminium, permettant une capacité de chauffage élevée tout en évitant « les points chauds ».

Les résistances électriques tubulaires isolées à la céramique sont particulièrement adaptées au service non interrompu de longue durée.

Le refroidissement du cylindre se fait par turbo-ventilateurs dans les 2 zones de pompage de la vis, et dans les autres zones par liquide. Le refroidissement de la zone de dégazage n'est pas prévu, puisqu'il n'est pas désirable.

Le contrôle du chauffage et du refroidissement est entièrement automatique.

Il est effectué par des régulateurs électroniques à modulation à 3 positions.



LES VIS des Extrudeuses KAUFMAN sont construites en acier allié à haute résistance. Les filets de vis sont stellités. Cette combinaison rend les vis très supérieures en **résistance à la fatigue et à l'usure.**

Les vis sont forées sur toute leur longueur, permettant le contrôle de leur température par circulation d'un fluide.

Les vis peuvent être livrées en simple étage, (vis conventionnelle) ou, ce qui est préférable, à deux étages. Les vis à deux étages **séparent complètement l'action de fusion** de la matière du **pompage** de la matière contre la pression de tête et filière.

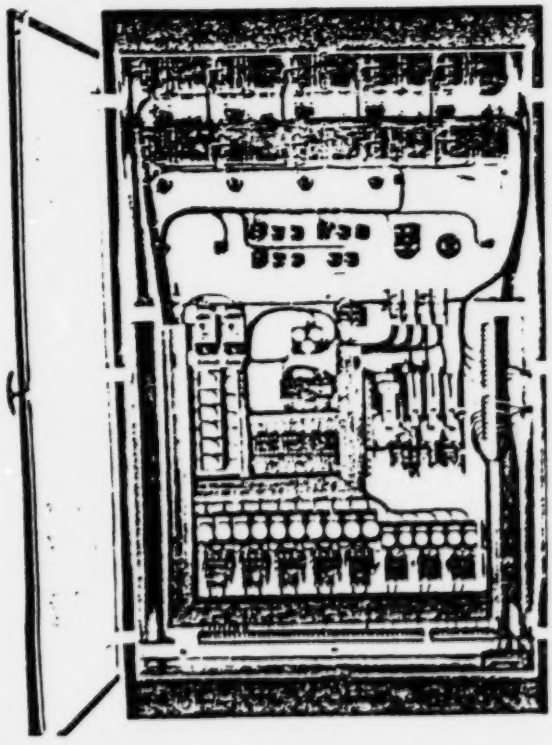
Les Extrudeuses KAUFMAN avec la vis à deux étages, peuvent être opérées à dégazage ouvert ou (sans dégazage) fermé.

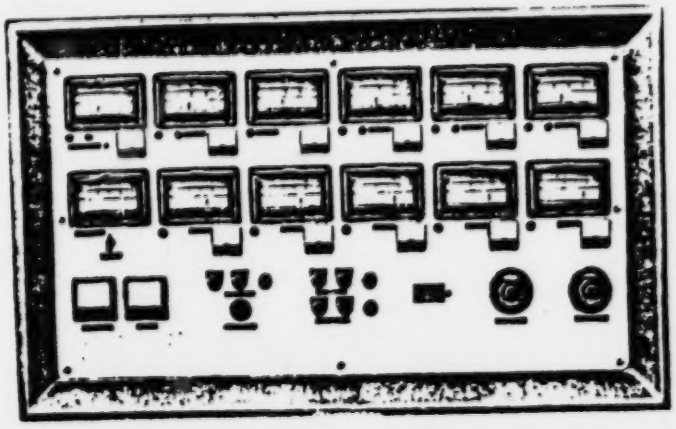
LA PORTE ARTICULEE en bout de cylindre est prévue pour un montage facile des différentes têtes et outillages.

LES CARTERS de protection du cylindre sont facilement amovibles.

L'EXTRACTEUR DE VIS semi-automatique permet l'enlèvement facile et rapide de la vis sans risque d'endommagement du groupe butée.

ARMOIRE DE CONTROLE





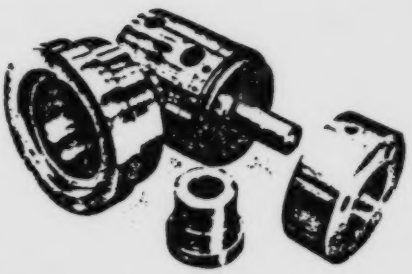
L'armoire de contrôle des Extrudeuses KAUFMAN est construite en tôle épaisse. Elle est étanche à la poussière. Le câblage est exécuté suivant les normes industrielles.

Elle contient :

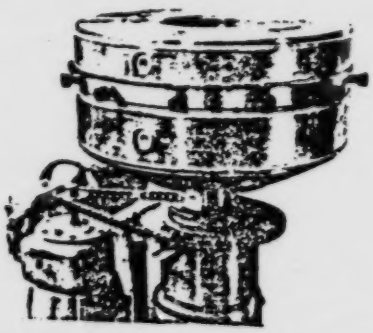
- Les régulateurs de température à modulation (PID) pour :
  le cylindre de l'extrudeuse,
  la tête et la filière (suivant l'outillage),
  la vis *.
- Les ampèremètres pour chaque zone de chauffage.
- Un indicateur de température de la matière **
- Un indicateur des températures internes de la tête et de la filière *
- Les régulateurs manuels pour :
  la température de la porte,
  le joint d'étanchéité arrière.
- L'indicateur de charge du moteur et l'indicateur de vitesse de la vis.
- Les boutons poussoirs pour :
  le démarrage et contrôle de vitesse du moteur de l'extrudeuse,
  le système de contrôle de température de la vis *,
  la pompe à vide *.
- La platine intérieure est peinte en blanc pour faciliter l'entretien. Sont montés sur cette platine :
  les contacteurs et fusibles individuels pour chaque circuit.
  le démarreur pour le système de contrôle de température de la vis et la pompe à vide *.
- L'armoire est fournie avec un faiscea de câbles pour connexion aux bornes repérées se trouvant sur le socle de l'extrudeuse. Tous les thermocouples sont fournis.

* Si nécessaire.
** Sauf pour PVC rigide.

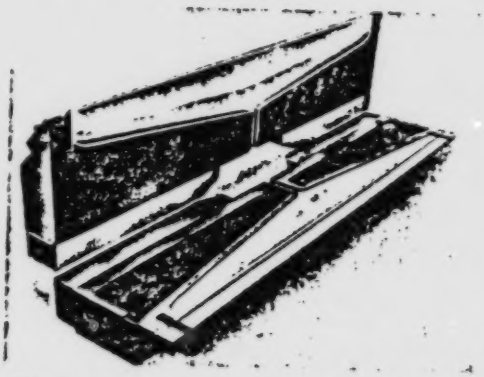
FILIERES



Gamme de **têtes pour tubes** pour les diamètres standardisés, et **têtes de paraison.** Toutes avec contrôle de température interne et externe (chauffage et refroidissement). Spécialement conçues pour la grande production de PVC rigide (poudre).

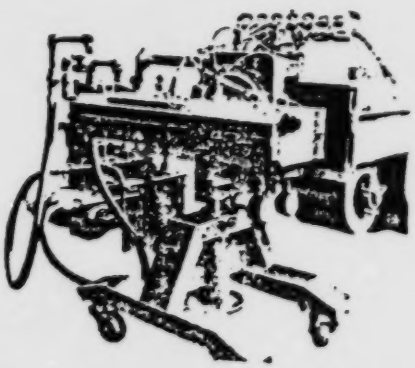


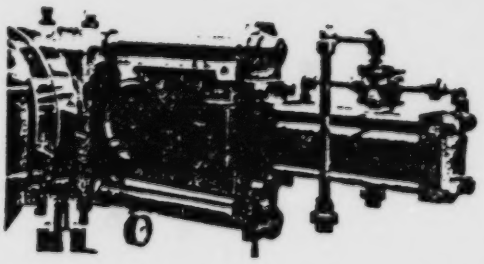
Filières rotatives, avec alimentation centrale. Pour gaine soufflée, spécialement adaptées pour PVC.



Filières pour plaques ou feuilles
largeurs: 500 à 3000 m/mn
Epaisseurs jusqu'à 12 mm.

CHANGEURS D'ECRAN





Changeurs d'écran permettant le changement d'écran, sans démontage de la tête. Le déplacement de la glissière se fait en moins d'une seconde, grâce au puissant système hydraulique d'entraînement.
Les Changeurs d'écran KAUFMAN sont fournis pour des Extrudeuses : 65 mm — 250 mm.

DISPOSITIFS DE TIRAGE ET DE CALIBRAGE POUR TUBES

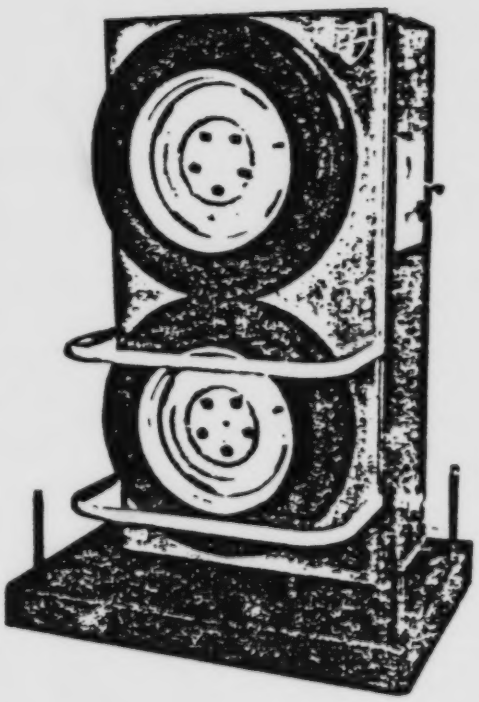
Pour la production de tubes et d'autres profils, un nouveau système de calibrage, de refroidissement et de tirage, a été conçu, permettant de suivre la capacité de production élevée des extrudeuses modernes.

La nouvelle TIREUSE KAUFMAN est équipée de deux roues à pneus d'une géométrie spéciale. Les deux roues sont entrainées par un moteur à courant continu, par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse,à deux rapports. Le moteur à courant continu de 2 ch est contrôlé par thyristors. Il a une gamme de réglage de 1 à 10. La pression de la roue supérieure se fait par vérin pneumatique, et elle peut être réglée avec précision. Le profil des pneus épouse la forme des tubes extrudés, ce qui assure une large surface de contact.

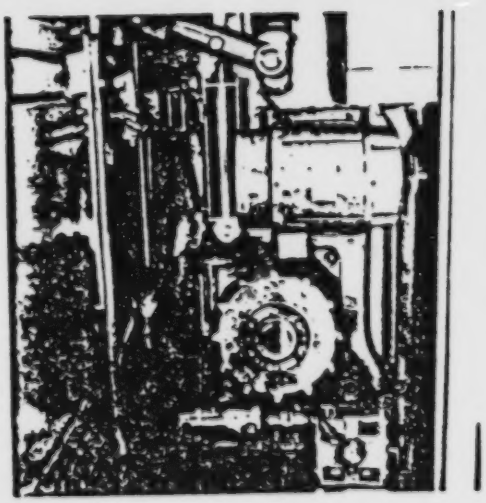
La plage standard de vitesse de tirage est de 0.30 m/mn à 20 m/mn. Cette machine peut tirer des tubes jusqu'à 225 mm ∅ extérieur.

Le dispositif de calibrage comporte une bague sous pression montée à l'entrée d'un bac sous vide de 3 m de longueur. Ce bac est rempli d'eau qui recouvre le tube extrudé. Le vide dans le bac est contrôlé. C'est la pression atmosphérique à l'intérieur du tube, qui le maintient rond, tandis que le contact direct du tube avec l'eau, assure un refroidissement efficace.

Une pompe de circulation d'eau garantit un refroidissement uniforme.
Une pompe permet le contrôle précis du vide. Le bac de calibrage peut être combiné avec un nombre de bacs de refroidissement, suivant les productions demandées.

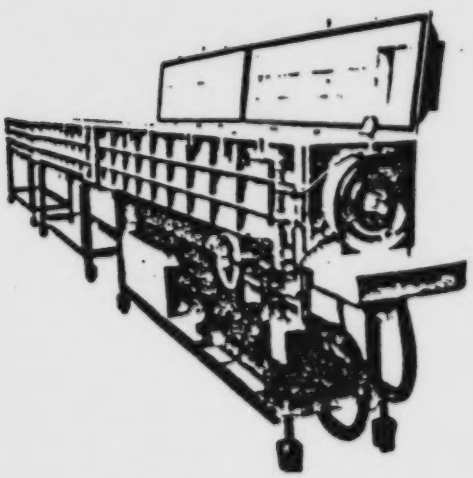


La Tireuse KAUFMAN



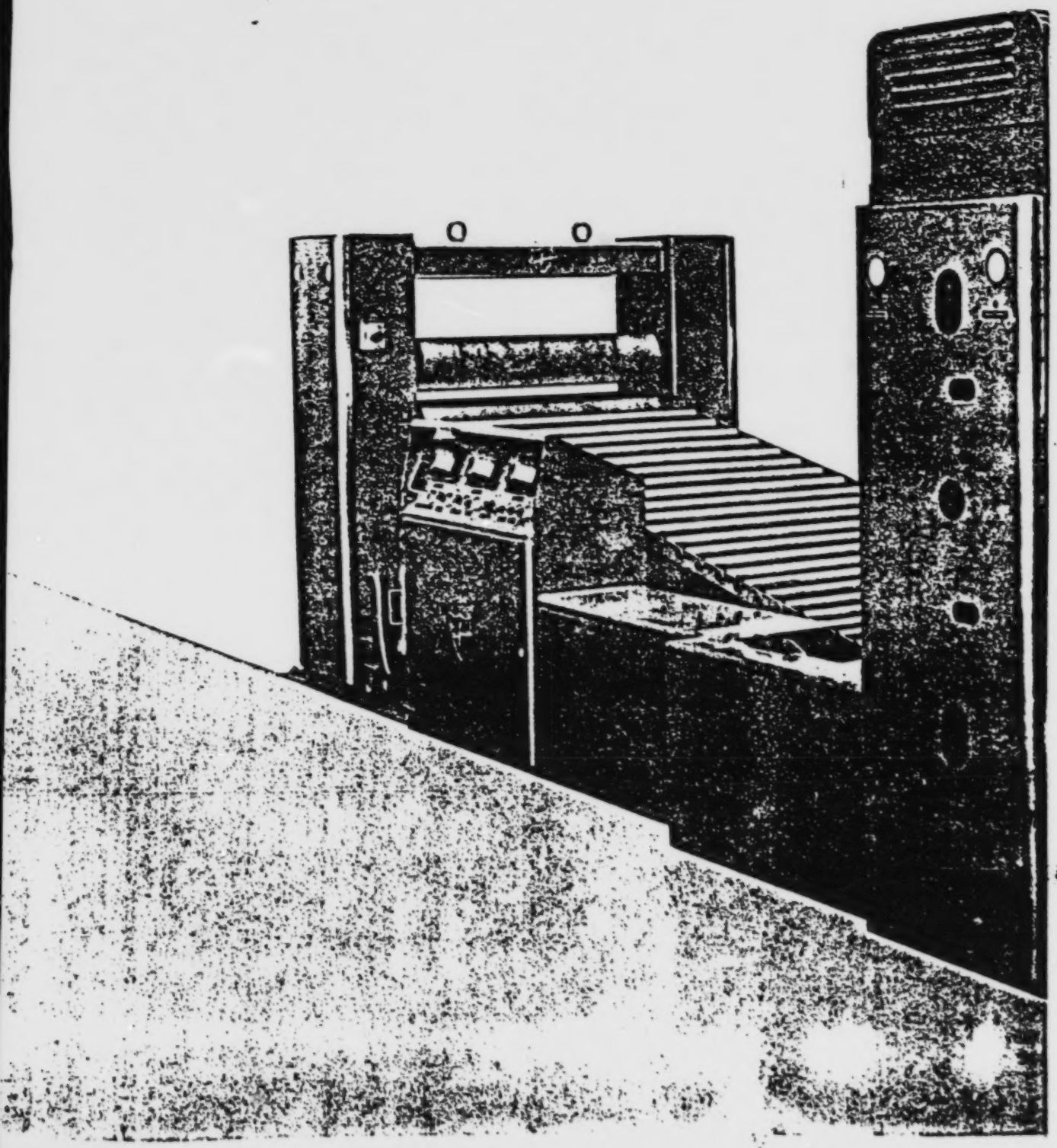
L'intérieur de la Tireuse à double entrainement

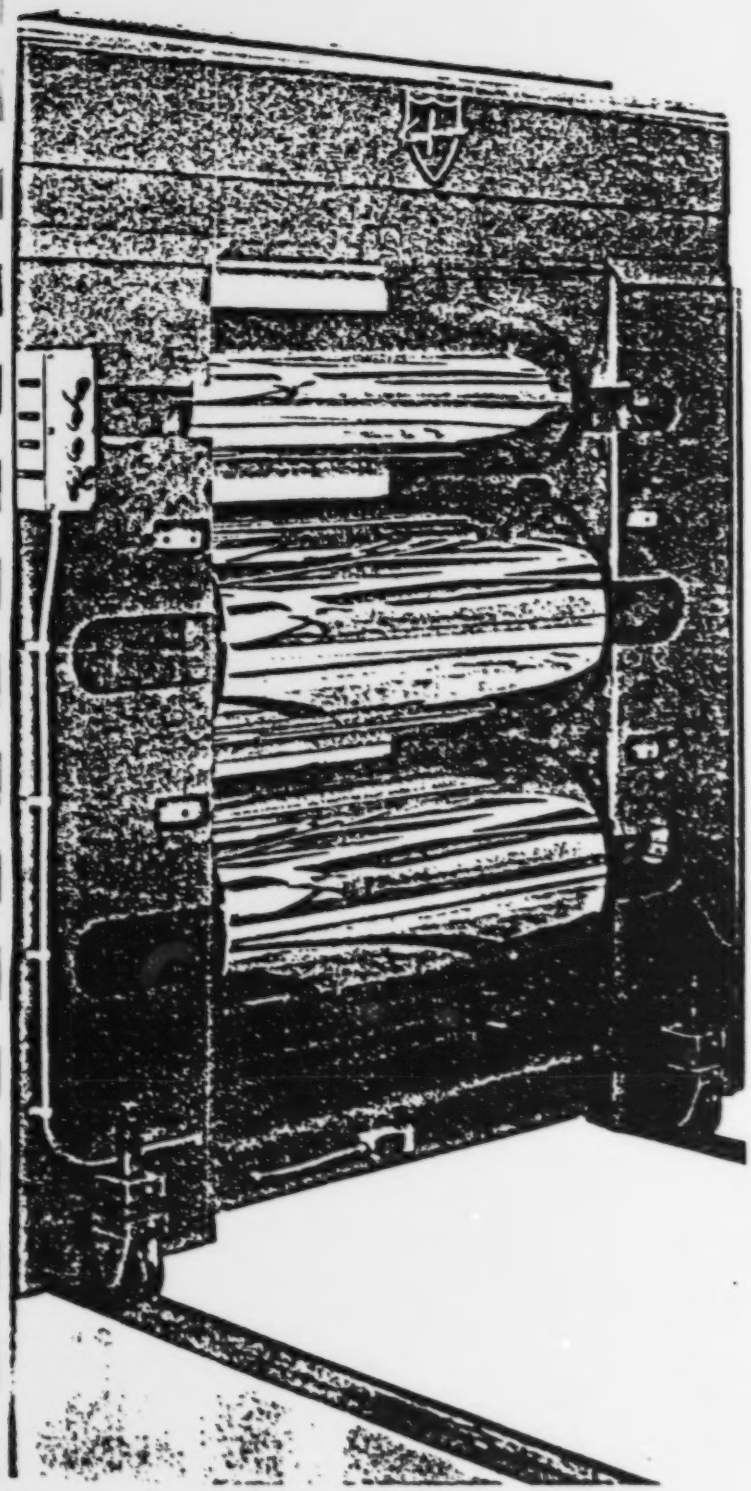
La Bague de Calibrage sous pression



Le Bac sous vide combiné avec des Bacs de refroidissement

TRAIN DE TIRAGE POUR PLAQUES





Les TRAINS de TIRAGE de PLAQUES KAUFMAN sont utilisés avec succès pour un nombre de matières plastiques, tel que : polystyrène, ABS, polyéthylène BP, polypropylène, PVC, polyméthacrylate de méthyle, polycarbonate, etc.
Ils produisent des plaques d'une épaisseur de 0,2 mm à 12 mm. Ils peuvent être fournis pour différentes largeurs, de 800 à 3000 mm.

Les trains de tirage comportent un groupe de **3 cylindres de polissage**, avec un **système de contrôle automatique** de température autonome **pour chaque cylindre.**

Les rouleaux de polissage peuvent être livrés en chromé, ou ce qui est bien supérieur, en acier inoxydable. Suivant la capacité de production de l'extrudeuse, ils sont livrés avec des diamètres de 200 à 500 mm, pour toujours garantir un refroidissement suffisant, même à des vitesses linéaires élevées.

Le réglage de la température de chaque cylindre est entièrement automatique, et s'effectue par des régulateurs électroniques à 3 positions. Des pompes à grande capacité circulent le fluide de contrôle de température entre les parois de chaque cylindre. **Les pressions des cylindres** supérieurs et inférieurs contre le cylindre du milieu sont réglables et maintenues avec précision par des vérins pneumatiques.

Ce groupe de polissage est relié aux **deux rouleaux de tirage** par un **convoyeur à rouleaux libres.** Les rouleaux de tirage sont recouverts de néoprène.

L'entrainement des cylindres de polissage et de tirage est assuré par deux moteurs indépendants à courant continu. L'alimentation de ces moteurs est commune par un redresseur au silicium. Le réglage de vitesse est continu, avec une précision de régulation de 1 %. La plage de réglage de vitesse est 1 à 10. Un réglage de vitesse différentiel avec une plage de 10 % est prévu entre les cylindres de polissage et les rouleaux de tirage.

Un **dispositif d'affranchissement** en largeur est monté entre les cylindres de polissage, et les rouleaux de tirage. Le train peut être équipé avec des **enrouleuses simples ou multiples,** ou avec un **massicot automatique combiné avec une empileuse.** Des **jauges à rayon béta** peuvent être incorporées.

VITESSE LINEAIRE :

0.25 à 20 m/mn.

ou 0,50 à 40 m/mn. en 4 plages

3. CONCEPTION DE LA VIS D'UNE EXTRUDEUSE

3.1 Fonctions fondamentales

Les fonctions fondamentales de l'extrudeuxe classique à une vis sont: 1° transport de la masse; 2° compression et fusion de la masse; 3° dosage et homogénéisation de la masse fondue. Ces trois fonctions de base ne sont pas réalisées dans trois zones strictement séparées de la machine. (FIG.1)

Transport de la masse (alimentation)

La vis de l'extrudeuse a pour fonction de faire entrer le matériau dans le cylindre et de l'y faire progresser. Comme les granulés ou la poudre sont compactés, ils se comportent comme une masse solide.

Compression et fusion de la masse

La compression qui a lieu dans le canal de la vis résulte d'abord de la géométrie de la zone de compression, ensuite de la résistance opposée par la masse fondue qui se trouve devant la pointe de la vis; le préchauffage et la plastification de la masse sont liés à cette compression. La position du point de fusion (caractérisée par l'endroit du canal de la vis où toutes les parties du matériau ont atteint leur température de fusion) dépend essentiellement de la transmission de chaleur du cylindre à la masse et, par conséquent, du début de la compression et de l'accroissement de pression (chaleur de frottement).

Une modification du début de la compression ou de l'augmentation de la pression déplace obligatoirement la position du point de fusion, et cela influe sur la qualité ou l'homogénéité (chevauchement avec la troisième fonction fondamentale). Pour obtenir un extrudat sans bulles, il faut que la compression géométrique soit plus grande que le rapport entre la densité vraie et la densité apparente, ce qui signifie que le mélange de matière

solide et de masse fondue doit être comprimé.

Dosage et homogénéisation de la masse fondue

Dans la troisième et dernière fonction fondamentale correspondant à la conception classique de l'extrudeuse, la masse fondue progresse grâce aux conditions d'écoulement laminaire et stationnaire. En outre, l'homogénéité mécanique (réduction et dispersion des particules) et thermique doit être en même temps assurée.

3.2 Description d'une vis

Les termes employés pour décrire une vis sont indiqués sur la figure 2. Le tableau 1, nous donne les dimensions des diamètres de la vis et le cylindre pour les extrudeuses de 1 1/2" à 8".

3.3 Le transport et l'écoulement du matériau dans une vis

Fusion par l'arrière du filet

Ce mode de fusion est le plus fréquent; il se produit pour les polystyrène, polyoléfine, polychlorure de vinyle. La matière fondue au contact du cylindre se tasse à l'arrière du filet. (FIG 3)

Fusion par l'avant du filet

C'est le mode de fusion des polymères moyennement visqueux. La résine, amollie par la chaleur du cylindre, passe entre la vis et le cylindre où les contraintes de cisaillement importantes terminent la fusion. Le départ de la résine vers l'arrière du filet crée une zône de dépression où se loge le polymère fondu.

Progression de la matière

Dans un fonctionnement idéal, l'ensemble vis-matière devrait se comporter comme un système vis-écrou. Pour celà, il faut empêcher la rotation de la matière avec la vis et lui imposer un écoulement longitudinal en augmentant le coefficient de frottement

matière-cylindre et en diminuant celui de la vis et la matière. C'est ce que l'on obtient avec une vis chromée ou en refroidissant la vis, car le frottement matière-métal augmente avec la température.

3.4 Conception des vis (screw design)

Les tableaux 2 à 4 et les figures 5 à 7 vous donnent des exemples de la géométrie de diverses vis pour les thermoplastiques les plus communs. On s'aperçoit que pour chaque thermoplastique, il y a un design de vis différent. Il y a plusieurs raisons, dont quelques-unes ont été mentionnées au début de ce chapitre expliquant le fonctionnement d'une vis et le comportement du matériau. Au point de vue de la productivité, une vis doit fournir le plus haut débit (Kg/hr) possible d'un matériau fondu et homogène à la filière. Cependant pour rencontrer ces deux critères (débit et écoulement homogène) le fabricant de vis doit tenir compte des propriétés différentes de chaque thermoplastique.

3.5 Le rôle d'une vis - Conclusion

Son but est de:

1. Transporter la matière plastique de la trémie d'alimentation vers la filière
2. Compresser la matière
3. Homogénéiser la matière par friction contre le cylindre du corps (barrel)
4. Et en même temps, rendre la matière fluide par l'élévation de température
5. Augmenter la pression de la matière fondue pour que celle-ci passe dans la filière.

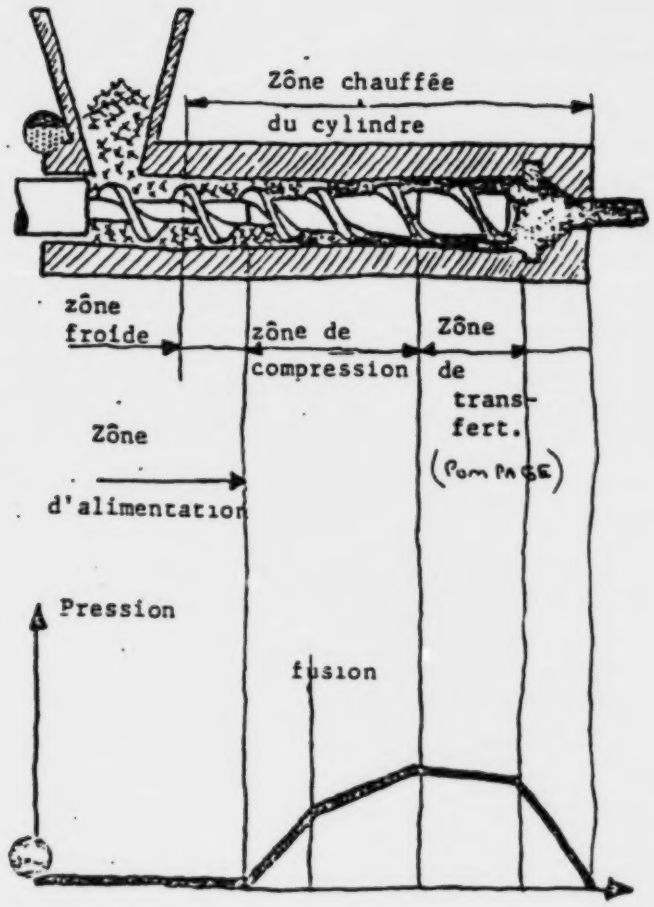

Zône chauffée
du cylindre
zône
froide
zône de
compression
Zône
de
trans-
fert.
(Pompage)
Zône
d'alimentation
Pression
fusion

FIG. 1

DESCRIPTION D'UNE VIS

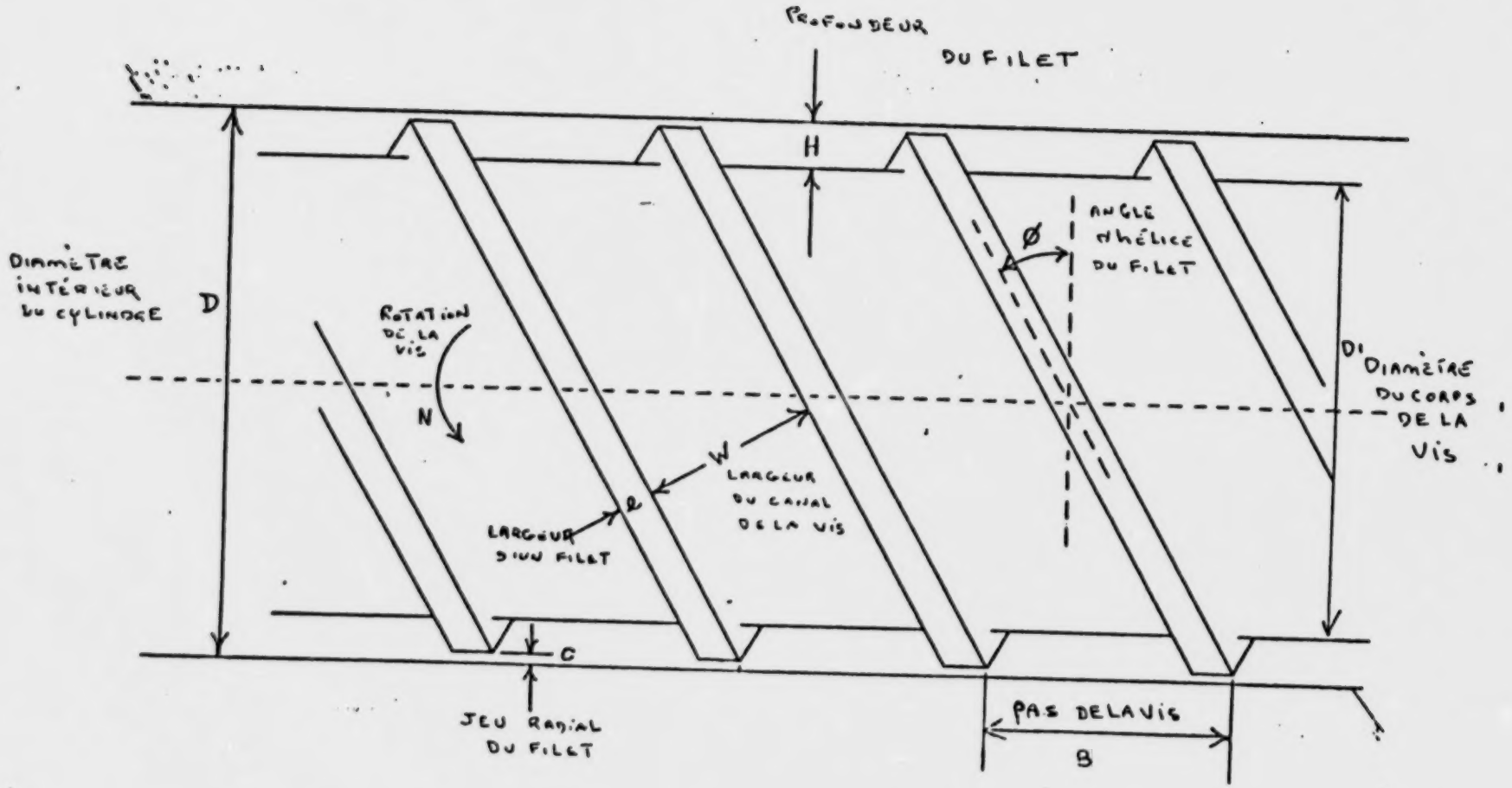


FIGURE 2 : EXTRUDER SCREW - DEFINITION OF TERMS

VIS DE L'EXTRUDEUSE -

TABLEAU I

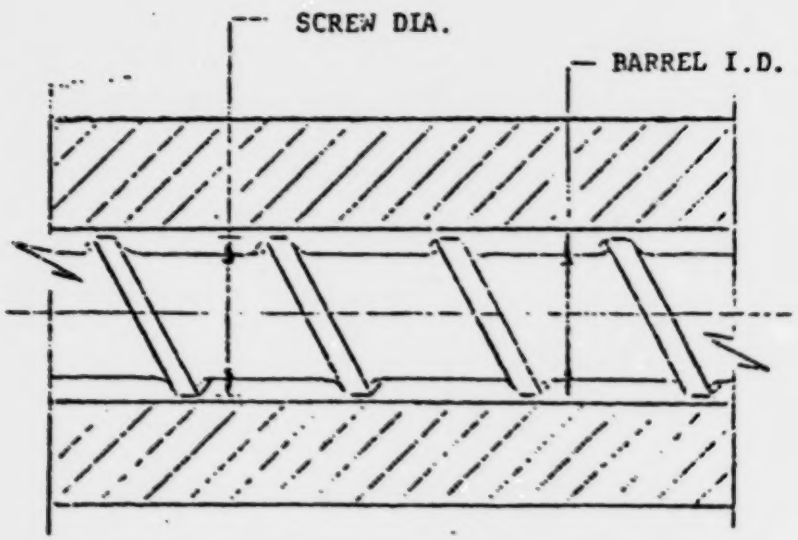
EXT. SIZE	SCREW DIA.	BARREL I.D.	NOMINAL DIAMETRAL CLEARANCE	SCREW GAP
1-1/2	1.494 / 1.493	1.501 / 1.500	.007"	.0035"
2-1/2	2.493 / 2.491	2.501 / 2.500	.008	.004
3-1/2	3.492 / 3.490	3.501 / 3.500	.009	.0045
4-1/2	4.490 / 4.488	4.501 / 4.500	.011	.0055
6	5.988 / 5.986	6.001 / 6.000	.013	.0065
8	7.985 / 7.983	8.001 / 8.000	.016	.008

Φ vis

Φ intérieur du cylindre

ESPACE TOTAL ENTRE LE FILET ET LE CYLINDRE

Jeu (espace) DU FILET



SCREW CLEARANCE DATA

FIG. 3

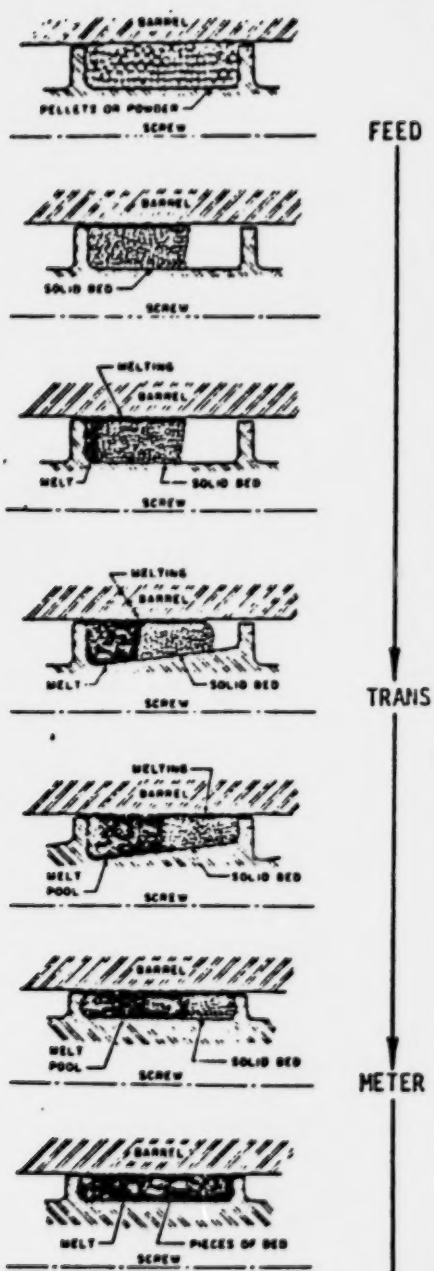
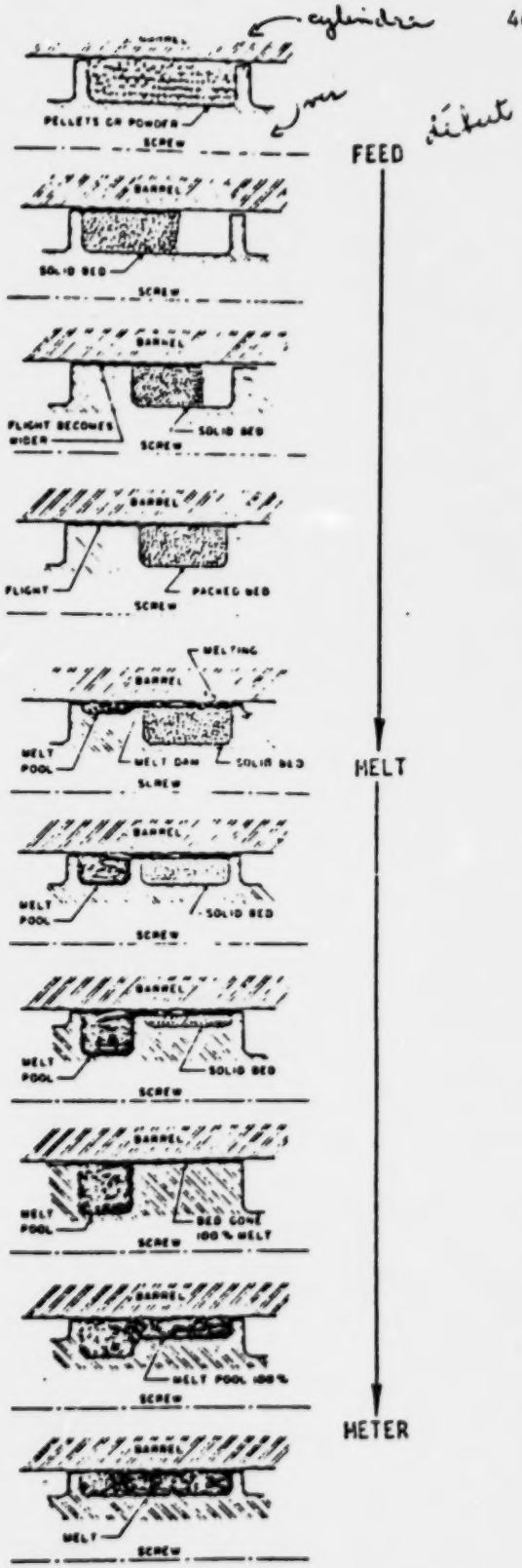


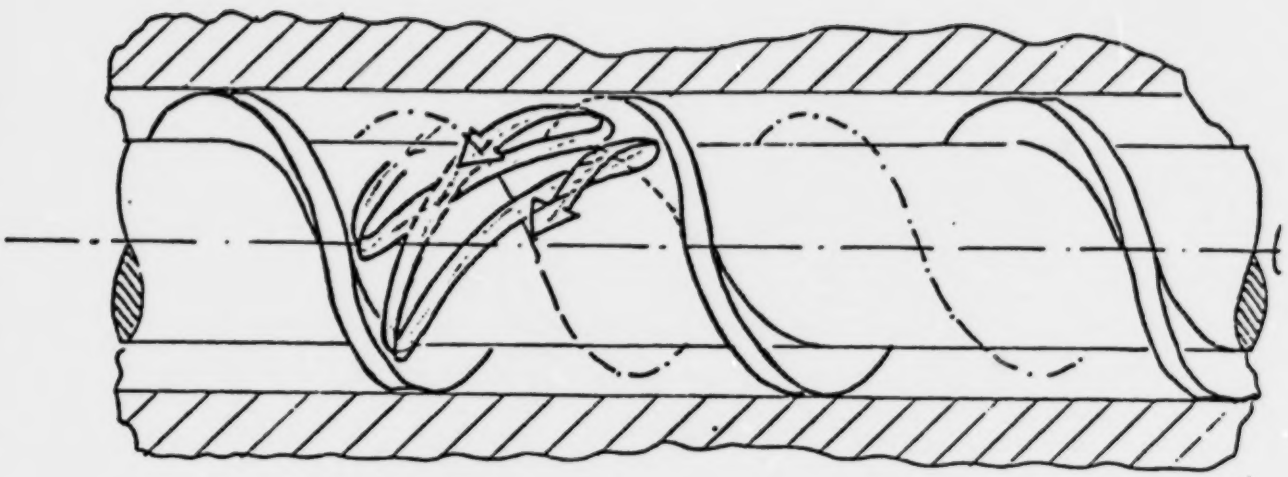
FIGURE 1

CONVENTIONAL SCREW



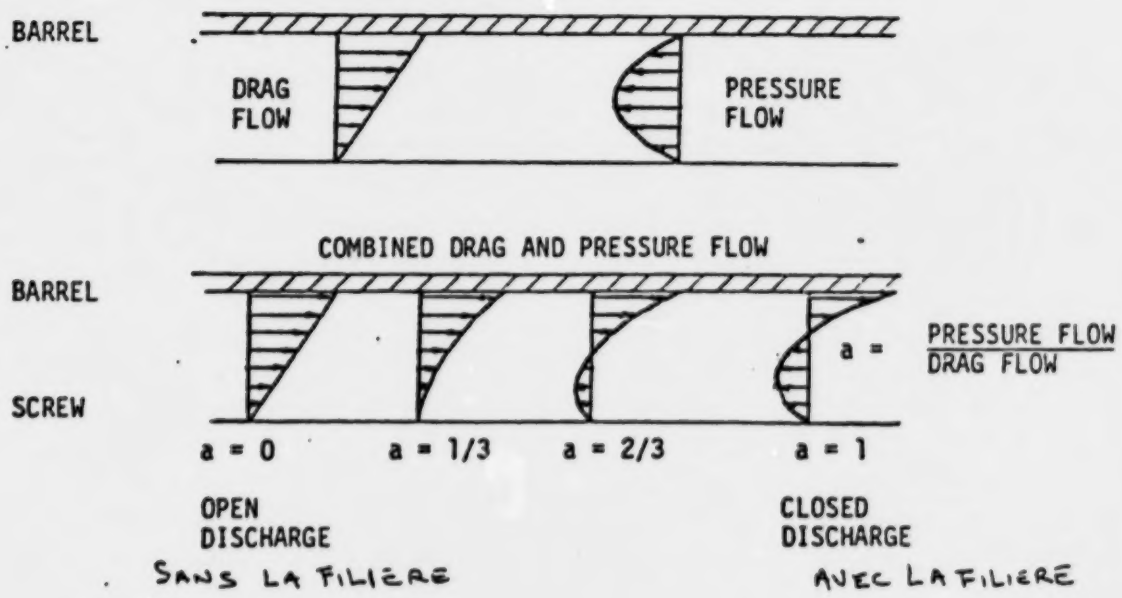
MC-3 SCREW
(WALDRON-HARTIG)

FIGURE 4



FLOW PATTERN IN THE METERING SECTION

ECOULEMENT DE LA MASSE FONDUE - SECTION POMPAGE



DOWNCHANNEL VELOCITY PROFILES IN THE METERING SECTION

TABLEAU 2

GEOMETRIE TYPIQUE D'UNE SIMPLE VIS - EXTRUDEUSE - 2½" 24:1 L/D

		PVC FLEXIBLE	PVC RIGIDE (A)	ABS	NORYL	PS
①	ALIMENTATION #FILETS	4-6	8	4	6	6
	TRANSITION OU COMPRESSION #FILETS	14	12	8	10	10
③	CALIBRAGE OU POMPAGE #FILETS	4	4 14	12	8.	8
	PROFONDEUR DU FILET (1)	.350"	.432"	.440"	.518"	0.400
	PROFONDEUR DU FILET (3)	.140"	.180" .185	.200"	.185"	0.100
	RAPPORT DE COMPRESSION	2.5	2.4	2.20	2.80	4.0
	FILTRES (SCREEN PACK)	20/40/40				

haute range

3.1 @ 4.0 pour famille ABS MONSANTO

(A) PVC. GRANULÉS

TABLEAU 3

GÉOMÉTRIE TYPIQUE D'UNE VIS PVC RIGIDE - PROFILÉS

EXTRUDEUSE 24/1

	BASSE TEMP.		HAUTE TEMPÉRATURE	
	2½	3½	2½	3½
TYPE DE VIS	SIMPLE		2-STAGE	
NOMBRE DE FILET-ZONE DE POMPAGE	4	4	3-4	4-6
PROFONDEUR	.180"	.270"	0.125-0.135"	0.180-0.210"
2 IÈME STAGE NOMBRE DE FILET-ZONE DE POMPAGE			3-5	4-7
PROFONDEUR			0.170-0.200"	0.250-0.300"
RAPPORT DE COMPRESSION	2.4	2.4	1.7-2.50	2.0-2.50
CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE DE LA VIS (HUILE)			190-300°F	
PVC	GRAIN (PELLETS)		GRAIN & POUDRE	
GRILLE (BREAKER PLATE)	OUI		NON (VIS À BOUT CONIQUE)	

TABLEAU 4

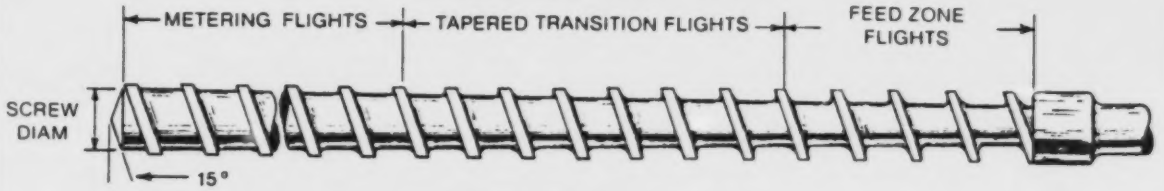
Géométrie typique d'une simple vis

Extrudeuse 2 1/2" 24:1

	PEBD		PEHD	PP	PP 4 1/2" 24:1
N° Filets Alimentation (1)	5	6	5-6	6-8	8
N° Filets Compression	3	6	8-9	8	7
N° Filets Pompage (2)	8	12	9-11	8-10	9
Section - Maddock	2	-			
	3				
Malaxage	3				
Profondeur du filet (1)	0.450	.375-.400		0.440	0.510
Profondeur du filet (2)	0.160	.125-.120		0.125	0.150
Rapport de compression	2.81	3.0-3.3	3.5	3.5	3.4

FIGURE 5: DESIGN AND GENERAL CHARACTERISTICS OF SCREWS RECOMMENDED FOR USE WITH ABS

SINGLE-STAGE FEED SCREW



GENERAL CHARACTERISTICS

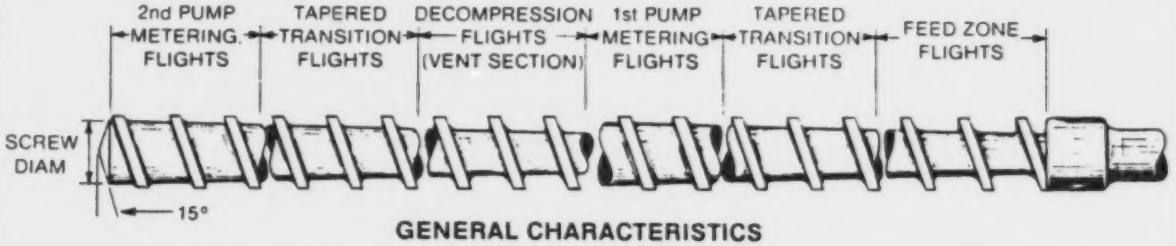
Compression ratio (by flight depth)	2.0:1
Helix angle (approx.)	17.7°

Length: Diameter Ratio	20:1	24:1	30:1
Constant feed section	4 flights	4 flights	6 flights
Tapered transition section	6 flights	8 flights	12 flights
Constant metering section	10 flights	12 flights	12 flights

Flight Depths

Extruder Size	Feed Section	Metering Section
2.5 in	0.440 in	0.200 in
3.5 in	0.440 in	0.200 in
4.5 in	0.550 in	0.250 in
6.0 in	0.660 in	0.300 in

TWO-STAGE FEED SCREW



GENERAL CHARACTERISTICS

Compression ratio (by flight depth)	
1st stage	2.5:1
2nd stage	2.0:1
Helix angle (approx.)	17.7°

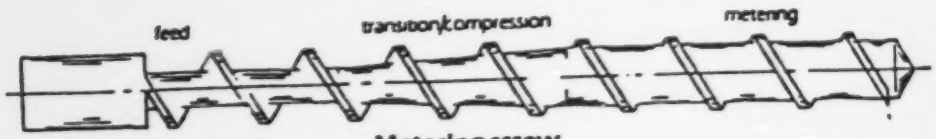
Length: Diameter Ratio	24:1	30:1
Constant feed section	4 flights	5 flights
Tapered transition section	Tapered to fit the extruder	
1st metering section	3 flights	3 flights
Transition section	1/2 flight	1/2 flight
Decompression section	4 flights	4 flights
Tapered transition section	Tapered to fit the extruder	
2nd metering section	5 flights	5 flights

Flight Depths

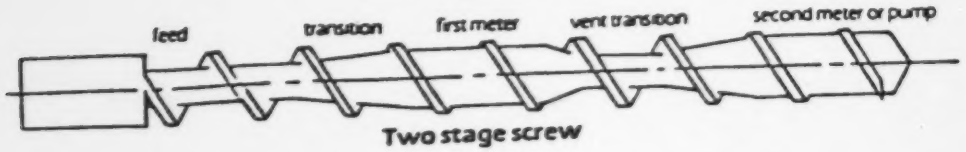
Extruder Size	Feed Section	1st Metering Section	Decompression Section	2nd Metering Section
3.5 in	0.500 in	0.215 in	0.650 in	0.285 in
4.5 in	0.550 in	0.225 in	0.750 in	0.325 in
6.0 in	0.675 in	0.260 in	0.780 in	0.360 in

F.G. 6

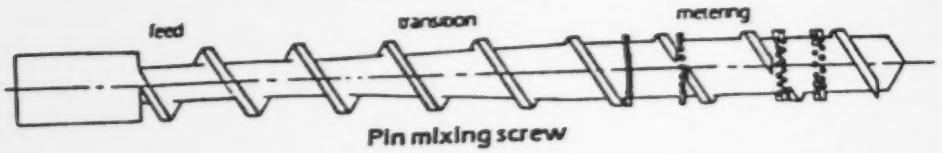
Davis-Standard Extrusion screws



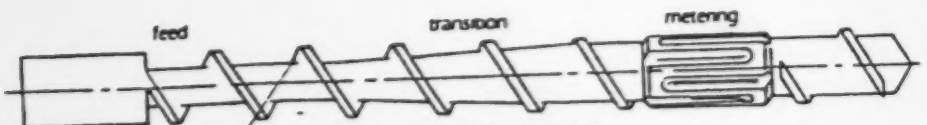
Metering screw



Two stage screw

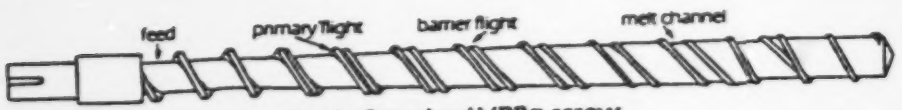


Pin mixing screw

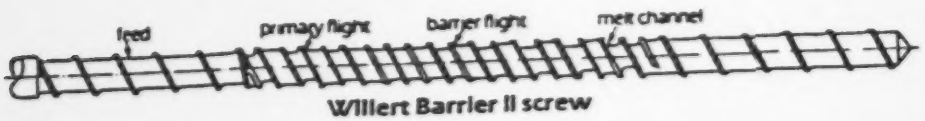


Maddock mixing screw

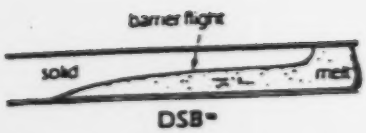
Davis-Standard Barrier (DSB)™ screw



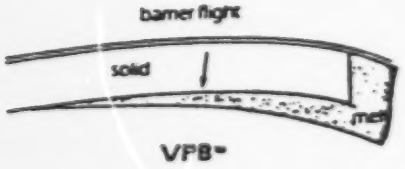
Davis-Standard VPB™ screw



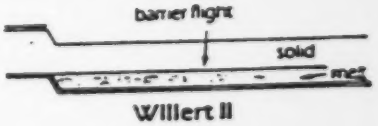
Willert Barrier II screw



DSB™



VPB™

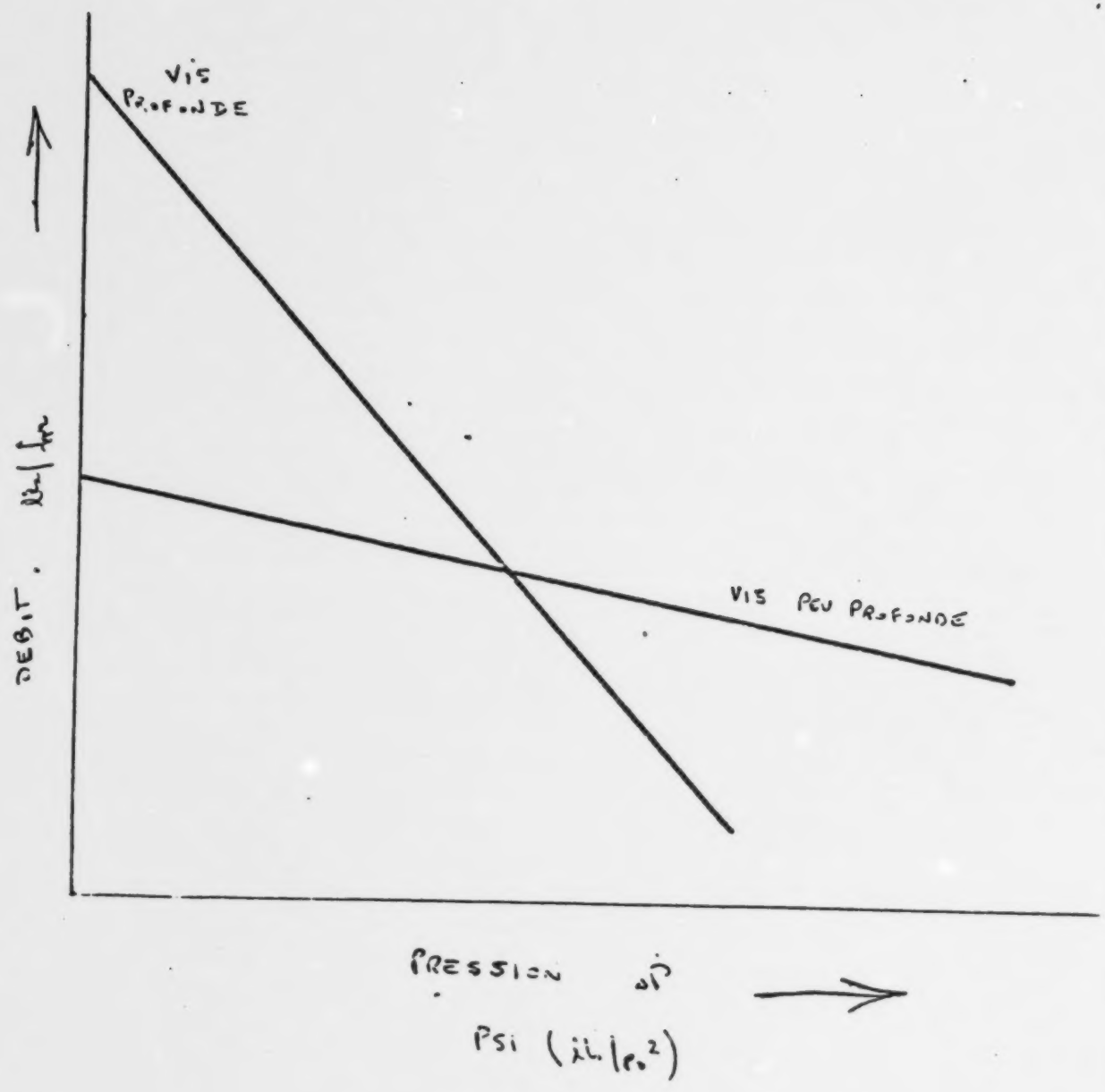


Willert II

Davis-Standard®

U.S. Route 1, Pawcatuck, CT 02891 USA
(203) 599-1010 Telex 966455

FIG. 7



4. PROPRIÉTÉS IMPORTANTES DES THERMOPLASTIQUES

Nous allons maintenant discuter des propriétés qui influencent le procédé d'extrusion.

4.1 Propriétés des solides

Les propriétés suivantes ont un rapport direct à l'alimentation des thermoplastiques à l'état solide (transport de masse) au début de l'extrusion:

densité solide (bulk density)

compressibilité

grosseur des particules (granules, grains, poudres)

coefficient de frottement

l'humidité (capacité d'absorption d'eau)

Les tableaux 1 et 2 vous montrent quelques exemples de ces propriétés. Les matériaux qui doivent être séchés sont énumérés dans le tableau 3.

4.2 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont très importantes pour l'extrusion puisque plusieurs phénomènes se produisent dans l'extrudeuse: chauffage, conduction de la chaleur, fusion (matériel fondu) et le refroidissement.

L'une des plus importantes propriétés est sûrement la conductivité thermique. Elle mesure la capacité du matériel à transmettre la chaleur. Les thermoplastiques sont en général isolants et ils ont une conductivité thermique très basse. Donc, il faut non seulement chauffer le cylindre mais surtout se fier à la vitesse de rotation de la vis laquelle génèrera la chaleur nécessaire pendant l'extrusion.

La chaleur spécifique nous dit combien d'énergie est nécessaire pour augmenter la température du polymère. Plus elle est haute plus on a besoin d'énergie pour fondre le polymère avant l'entrée de celui-ci dans la filière.

Le point de fusion (T du polymère fondu) est naturellement important. Les températures du procédé d'extrusion doivent être au-dessus du point de fusion afin d'assurer une homogénéité et un comportement uniforme de l'écoulement de la matière. Les extrudeuses opèrent en général, de 20 à 50°C au-dessus du point de

fusion du polymère. Les thermoplastiques ayant un haut point de fusion requièrent soit des extrudeuses plus longues (30:1) ou/et une modification de la vis (screw design). Voir tableau 4.

Les thermoplastiques sont soit amorphes ou semi-cristallins. Ceux qui sont amorphes, ont une structure désordonnée et les semi-cristallins ont une structure ordonnée (chaînes moléculaires sont repliées de façon régulière) ou coexistant des zones amorphes (voir figures 1-4).

Exemple: le polystyrène est amorphe tandis que le polyéthylène peut avoir un degré de cristallinité variable:

	bas	PEBD (low density PE)
% de cristallinité		PEMD
	haut	PEHD (high density PE)

Les thermoplastiques cristallins demandent beaucoup plus d'énergie pour les faire fondre que ceux qui sont amorphes. Par exemple, la chaleur de fusion se situe entre 50 et 100 BTU/lb. Donc, les matériaux cristallins demandent plus de chaleur nécessaire pour la mise en forme.

4.3 Propriétés d'écoulement (viscosité)

La viscosité (comportement des polymères fondus) est une mesure de la résistance du matériel fondu durant l'écoulement. Cette viscosité (environ 1,000,000 à 10,000,000 fois celle de l'eau) est fonction:

a) du polymère et de son poids moléculaire

b) de la température

c) de la pression.

En principe, le matériau devient plus visqueux lorsque le poids moléculaire augmente ainsi que la température et la pression sont réduites. Au contraire, lorsque l'on augmente la température et la pression, la viscosité baisse et le matériel fluide s'écoule plus facilement. On a simplifié cette explication car il y a plusieurs autres phénomènes qui influencent le comportement des thermoplastiques fondus. Par exemple, les macromolécules, déformées par l'écoulement et la mise en oeuvre, ont tendance à reprendre leurs formes non déformées.

Ce phénomène est visible avec le gonflement en sortie d'une filière d'extrudeuse ou avec les déformations d'une pièce éjectée d'un moule avant le refroidissement définitif et dont tous les défauts sont liées à l'écoulement.

4.4 Autres propriétés

Nous avons mentionné les propriétés des thermoplastiques les plus importantes par rapport à l'extrusion. Cependant, il y a plusieurs autres propriétés qui influencent le bon rendement de l'extrudeuse à long terme. Citons les compounds (résine + adjuvants*) qui se comportent souvent différemment de la résine "vierge" employée pour ce même compound. Les compounds de PVC sont un exemple frappant puisqu'on peut avoir des PVC flexibles, semi-ridiges et rigides en plus d'avoir la propriété de s'extruder à basse ou haute température en changeant la formule du compound PVC (voir tableau 5).

* Additives, fillers, pigments.

TABLEAU 1

INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DES GRAINS-PEBD

AU RENDEMENT DE L'EXTRUDEUSE

GEOMETRIE DES GRAINS	DENSITE SOLIDE (Bulk density) lb/ft^3	DEBIT lb/hr	(kg/hr)
randonnée	18-19	50	(22.72)
cubique	25-30	91	(41.36)
cylindrique	31-32	95	(43.18)
sphérique	34	100	(45.45)

TABLEAU 2

COEFFICIENTS DE FRICTION - QUELQUES POLYMERES

TYPE	C de F. * entre Polymère et acier
PEBD	0.25 - 0.50
PVC (grains)	0.44 - 0.50
PS	0.4 - 0.5
NYLON	0.25
TEFLON	0.04

* coefficient de frottement

TABLEAU 3

THERMOPLASTIQUES HYGROSCOPIQUES (a)

Capacités de séchage

Matières	Température de séchage (°C)	Durée de séchage (h) -·-	Standard (kg/h)	Special haute-température (kg/h)
A.B.S.	80	3 1/2	21	
Acétal	100	2 1/2	24	
Acrylique	70-80	2 1/2	24	
Barex	70	7	24	
Cellulosiques ▲	70	2 1/2	19	
Ionomère	65	9	15	
Nylon (sauf type 6)	70	5 1/2	17	
Polycarbonate	120	4 1/2	19	
Polyéthylène avec 40% de noir	90	3 1/2	17	
PETP ·-·-	160-190	5		19
PBT ·-·-	135	3 1/2		19
PETG	70	–	22	
Polyamide	120	2 1/2	19	
Polypropylène	90	1 1/2	19	
Polystyrène (choc)	80	1 1/2	26	
Polystyrène (cristal)	80	2	24	
Polysulfone	120	4 1/2	26	
Polyuréthane	80	3 1/2	19	
PPO (Noryl)	125	2 1/2	26	
SAN (Styrène Acrylo Nitrile)	80	2 1/2	24	
Vyniles (PVC)	70	1 1/2	26	

·-·- Voir "Comment choisir une trémie de séchage CONAIR".
·-·- Demande Sécheur Spécial Haute-Température modèle D-60H.
▲ Pour les Cellulosiques, il faut installer un collecteur de plastifiant sur le retour.

(a) absorbe l'humidité de l'air

TABLEAU **Propriété thermique de quelques thermoplastiques**

	PEBD[a]	PEHD[a]	PP[a]	PVC[b]	PS[b]
Température de fusion, °C	110 130	120 140	176	>146	--
Conductivité thermique cal/sec./cm/°C x 10^{-4}	8	11 12.4	2.8	3.5 5.0	2.4 3.3
Chaleur spécifique	0.55	0.55	0.46	0.25 0.35	--
Masse volumétrique g/cm^3	0.910 9.25	0.940 0.975	0.900 0.910	1.30 1.58	1.04 1.09

(a) cristallin

(b) amorphe

Tableau 4 Propriétés thermiques importantes

	DENSITE (g/cm^3)	TEMPERATURE DE FUSION (°C)	CONDUCTIVITE THERMIQUE (10^{-4} cal/sec/cm/°C)	CHALEUR SPECIFIQUE (cal/°C/gr)	CHALEUR DE FUSION (cal/gr)
Polyéthylène (LDPE)	0.910-0.925	110-130	8.0	0.55	65
Polyéthylène (HDPE)	0.941-0.965	120-140	11.0-12.4	0.55	70
Polypropylène (PP)	0.902-0.910	176	2.8	0.46	15-60
Polyvinyl Chloride (PVC)	1.30-1.58	146	3.5-5.0	0.25-0.35	-
Polystyrène (PS)	1.04-1.09	-	2.4-3.3	0.32	-
Polycarbonate (PC)	1.20	-	4.6	0.28-0.30	-
Polyamide PA-6	1.12-1.14	225	5.8	0.40	37-49

STRUCTURES AMORPHES ET CRISTALLINES

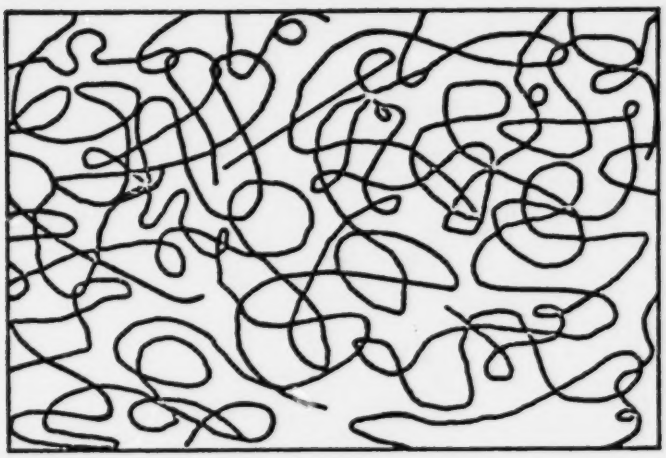


FIG. 1

Modèle d'un polymère amorphe (PS, PVC)

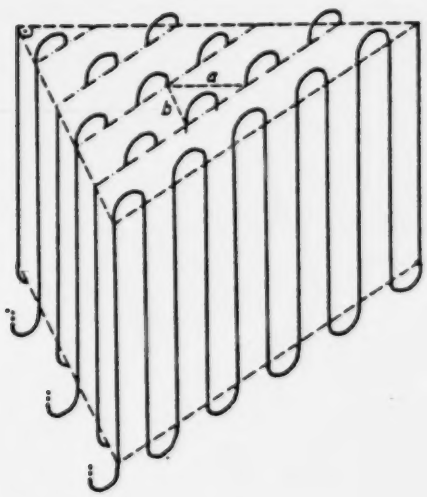
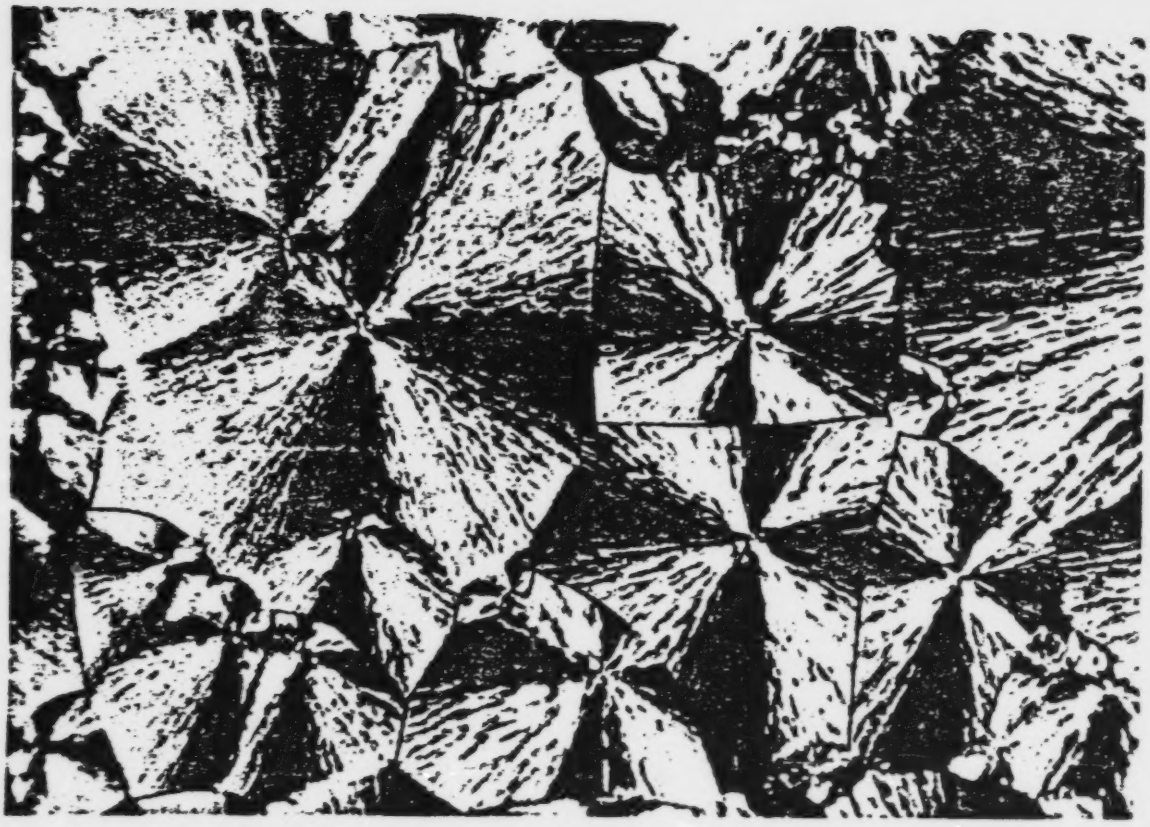


FIG. 2

Modèle d'un cristal de chaînes polymériques pliées

FIG.3



PE cristallisé sous forme de sphérulithes

FIG.4

STRUCTURES SEMICRISTALLINES ORIENTÉES

TABLEAU 5

DEBIT, LBS./HR. - PVC RIGIDE

		Low Temp.	High Temp.
2 1/2"		70-90	250-350
3 1/2"		80-150	400-550
4 1/2"		120-180	600-750
		8700A	87255
Compound	BFG	82662	87256
		87262	

4.4 CARACTERISTIQUES DES THERMOPLASTIQUES

Chaque matière est analysée en donnant successivement :

- le processus de formation ;
- les caractéristiques générales ;
- les utilisations types ;
- et celles en développement, en cours de démarrage ou possibles.

STYRÉNIQUES

Caractéristiques générales

	Avantages	Inconvenients
PS	- rigidité - stabilité formes et dimensions - transparence cristal possible (transmission 90 %), brillance - résistance au climat tropical - excellente isolation électrique HF - alimentaire - coût réduit - facilité de moulage et formage (large intervalle de température) - faible retrait (precision 1/10 mm) - collage, décoration et impression aisés - soudure par ultrasons	- fragilité - mauvaise tenue thermique (60 à 70° C) - combustible - électrostatique - coefficient de traction relativement élevé - sensibilité aux hydrocarbures, huiles et solvants (trichlorethylène) - soufflage difficile
PSC	- tenue aux chocs améliorée	- rigidité et brillance atténuées - opacité
SAN	- résistance aux chocs et à la rayure - brillance - comportement meilleur à la fissuration sous contrainte - tenue aux hydrocarbures	- transparence colorée seulement - reste fragile
ABS	- rigidité (en particulier opposition avec PEhd et PP semi-rigides) - stabilité dimensionnelle - aspect agréable (surfaces dures et brillantes) - bonne résistance aux chocs et aux rayures - assez bonne tenue à l'humidité et à la chaleur - bon comportement en présence de corps gras - alimentaire - moulage et formage aisés - facilité d'impression et de décoration par métallisation sous vide ou électroplacage	- opacité - très électrostatique - tenue chimique assez faible - mauvaise tenue au vieillissement à l'extérieur
MBS	- bonnes caractéristiques mécaniques - transparence	

Les ABS représentent, en fait, un produit à part dans la famille des styréniques. On peut les comparer un peu a des alliages et les propriétés sont fonction des proportions relatives des trois monomères les constituant.

En règle générale, ceux-ci apportent :

- acrylonitrile : aspect de surface
- butadiène : résistance aux chocs (venant des élastomeres)
- styrène : facilité de mise en œuvre et brillance.

Un ABS courant comporte les proportions suivantes :

A = 20 %; B = 30 %; S = 50 %

Les qualités renfermant 55 à 85 % de styrene acrylonitrile conviennent bien à l'extrusion. Celles pour lesquelles cette proportion passe de 75 à 95 % sont utilisees en injection.

Les ABS sont parfois mélanges au PVC à des taux de 15 à 20 % pour améliorer la mise en œuvre de celui-ci et accroître sa tenue aux chocs.

Préparation

A partir du styrene monomere, on peut obtenir les polymeres suivants :

Par polymérisation :

styrene →	polystyrene homopolymere	PS	par melange : PS demi choc :
styrene + butadiène (3 à 10 %) →	dérivé : polystyrene choc	PSC	
styrène + acrylonitrile (20 à 30 %) →	copolymere	SAN	

Par polymérisation ou par greffage :

styrène + butadiene + acrylonitrile styrène butadiène et acrylonitrile	terpolymere	ABS
styrène et butadiène méthacrylate →	terpolymere	MBS

Utilisations types

PS et PSC :

- emballage thermoformé (pots de yaourt, de crème, gobelets...) ou injecté (boîtage, quincaillerie, papeterie...), bouchage ;
- ameublement, armoires de toilette, diffuseurs d'éclairage, articles ménagers, cabines de douches ;
- appareils de radio, téléviseurs, électrophones (coffrets et pièces moulés : bas de gamme) ;
- électroménager, bacs, cuves et contre-portes de refrigérateurs domestiques ;
- jouets, articles de bureau et de dessin, stylos à bille, talons de chaussures de femme, bobines de fils à coudre.

SAN :

- articles menagers, électroménager et sanitaire ;
- bobines électroniques ;
- feux de position et feux arrière de cycles ;
- dessus de tourne-disque.

ABS :

- automobile (éléments de garnissage interne, calandres) ;
- électroménager (capotages, carters, cuves de réfrigerateurs isolés au PU...) ;
- appareils de radio, téléviseurs, appareils photo (boîtiers haut de gamme) ;
- appareils téléphoniques ;
- ameublement, éléments de caravane ;
- bagagerie ;
- dessus de ski (feuille colorée du décor) ;
- petites pièces chromées (bouchons, boutons, boucles, poignees...).

Utilisations en cours de développement

PS ou PSC :

Pour des raisons de prix, on a assisté à un **recul de l'emploi du PS au bénéfice du PP** dans le jouet, boîtage, bouchage, seringues à jeter, ménager, électromenager, ou encore à une concurrence du PU pour les talons de chaussure. (On prevoit également une poussée du PP dans l'emballage thermoforme aux depens du PS.)

Ce polymère garde néanmoins l'avantage d'être, parmi les materiaux de bas prix relatif, **le seul vraiment rigide et transparent** permettant la realisation de pieces precises et minces par injection (cette rigidité pouvant également exister dans une variante épaisse par le jeu des alleges).

On peut donc encore prevoir pour ce materiau une expansion liee :

A la croissance des loisirs qui entrainera une consommation de produits de grande diffusion :

- magasins de films, photo et cinema ;
- cassettes pour magnetophones et magnetoscopes.

Au developpement de l'emballage rigide alimentaire, en liaison avec des techniques de :

- biorientation : permettant de thermoformer un PS cristal ;
- co-extrusion : semi-conserves thermoformees ;
- injection soufflage : pots transparents (confiture, moutarde, condiments...).

A la realisation d'objets jetables :

- rasoirs, boîtes d'allumettes, vaisselle pour hôpitaux... (sous reserve que le bilan energetique et économique « jetable » par rapport au « lavable » soit favorable ou fonctionnellement imposé).

A l'accroissement de l'emballage thermoformé et de la gobeleterie pour distributeur automatique de boisson (généralisation de l'emploi).

A la possibilité de remplacement du bois par des grosses pièces de structure en PS allégé :

- ameublement (rangement), mobilier de bureau, carrosserie d'appareils de radio, téléviseurs et electro-

phones, baffles de haut-parleur, souvent peintes (peinture astatique).

ABS:

Pour des raisons économiques **l'ABS a du céder des places au PP** qui demeure, en pieces moulées, son concurrent le plus direct. Et, dans le haut de gamme, il rencontre egalement **la concurrence du PPO.**

Il perdra probablement, pour des raisons fonctionnelles, le marche des calandres automobiles au benefice de conceptions intégrees en PP, PU ou SMC et celui des casques de motos ou le PC a tendance à le supplanter.

Cependant, **l'ABS reste un matériau plus rigide que le PP (semi-rigide)** et il garde en injection de bonnes possibilités de développement, par exemple dans la realisation des produits suivants:

- capotage pour: materiel de bureau, ecrans d'informatique, calculettes, téléviseurs portatifs, appareils de photo ou cinema, tondeuses à gazon, motocycles;
- elements de carrosserie de mini-voiture (voiturettes), de caravanes, d'embarcations legeres (coques), planches à voile;
- ameublement (injecte allégé ou thermoforme).

VINYLIQUES

Préparation

On distingue d'abord deux grandes classes de polyvinyles, les **rigides** et les **souples**, ainsi prepares:

polymerisation de chlorure de vinyle	→ homopolymere	PVC ou PVC rigide
PVC + 35 à 40 % de plastifiants (esters et polyesters)	→ derive	PVC plastifié ou souple

Puis, l'ensemble des produits suivants, egalement consideres dans la famille des vinyliques:

- Polyvinyle surchlore PVC C: teneur en chlore 70 % au lieu de 56 % par substitution d'atomes Cl aux atomes H.
- Melange (PVC ABS): vu precedemment (à ABS).
- Acetate de polyvinyle (PVA).
- Butyral de polyvinyle (PVB).
- Acetochlorure de vinyle (PVA/PVC): copolymere de PVC (85 %) et d'acetate de vinyle (15 %).
- Alcool polyvinylique (APV).
- Polyvinylidene (PVD).

Industriellement, la polymerisation du chlorure de vinyle peut être realisee par les trois procedés classiques:

- **emulsion:** on obtient une granulometrie de 1 à 30 µm qui est utilisée en enduction sous forme de plastisol,
- **suspension:** la granulometrie est alors comprise entre 100 et 300 µm et permet la realisation de melanges secs (« dry blend ») que l'on peut employer directement en extrusion,
- **masse:** les résines ainsi preparees allient à une très grande purete une faible absorption d'eau et sont fréquemment utilisées pour le calandrage et l'extrusion.

Les transformateurs n'utilisent pas du PVC pur, mais des mélanges prépares par les producteurs sous forme de poudres ou de granulés, suivant le schema de la figure 7.

On peut également employer des plastisols qui constituent alors une suspension de PVC en milieu de plastifiants et se présentent sous forme de pâtes (seules les resines en emulsions se prêtent à la fabrication des pâtes).

N.B.: Un transformateur peut integrer la formulation (fabrication de ses compounds) s'il atteint un seuil de consommation de 50 à 100 t. mois.

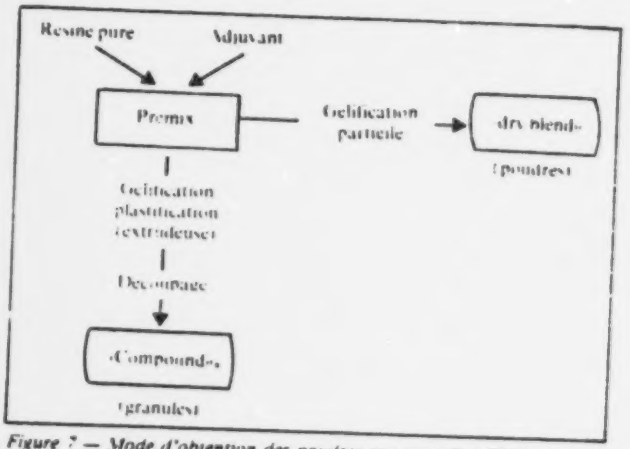


Figure 7 — Mode d'obtention des poudres (ou granules) PVC utilisables par les transformateurs.

Utilisations types des PVC

PVC rigide:

- tubes (adduction d'eau, bâtiment, assainissement, irrigation, drainage, gaine pour câble), raccords;
- corps creux: bouteilles alimentaires (eau, huile, vin vinaigre), flacons de parfumerie;
- emballages thermoformes (beurre, biscuit, confiserie, fruit, cachet pharmaceutique...), blisters (conditionnement sur carte, couvercles;
- profilés (volets roulants surtout);
- chaudronnerie (plaques);
- disques microsillon (avec acétochlorure);
- cartes de credit.

PVC souple:

- revêtements de sol (sur feutre, amiante ou vinylique en feuille et dalle); ces produits comportent environ 15 % de PVC enduit;
- tissus enduits (sièges d'automobile et mobilier, maroquinerie, bagagerie, vêtements, chaussures);
- isolation de câbles et fils électriques;
- profils souples et joints;
- chaussures et semelles;
- couvertures de classeurs et cahiers, trousses, housses;
- « maroquinerie plastique », bagagerie souple;
- nappes, rideaux;
- objets gonfables publicitaires.

Caractéristiques générales des PVC

	Avantages	Inconvénients
PVC rigide	- rigidité, stabilité dimensionnelle - résistance à l'abrasion - auto-extinguibilité - transparence possible (pour qualité suspension ou masse) - absorption d'eau pratiquement nulle - imperméabilité aux gaz et perméabilité relative à la vapeur d'eau (contraire du PE) - alimentaire - bon comportement aux agents chimiques (huile, graisse, ozone) - extrusion, formage, usinage, soudage HF aisés	- densité relativement élevée (1,4) - fragile à basse température - brunissement aux UV - précautions à prendre à l'injection (faible intervalle de température) - dégagement de vapeurs chloreuses en cas de décomposition - mauvaise tenue en présence de carburants
PVC souple	- souplesse comparable au caoutchouc - soudage HF aisé	- tenue chimique réduite par l'adjonction de plastifiants - nécessité d'anti-oxydants (pour éviter l'oxydation des plastifiants) et d'agents de blocage (pour éviter la migration des plastifiants) - non alimentaire - collage difficile

Utilisations en cours ou en développement

PVC rigide :

Il semble que l'on ait fait le plein avec la bouteillerie alimentaire où la France, avec 2,5 milliards de cols par an, représente le tiers de la production européenne.

Ce matériau devrait par contre se développer dans le **bâtiment** où il demeure la seule matière naturellement autoextinguible de bas prix, facilement transformable par extrusion (procédé en continu bien adapté à ce type de marché).

La croissance du PVC rigide est donc liée à l'ouverture des marchés du bâtiment, en particulier pour les produits suivants :

- encadrements de fenêtres avec l'essor du double vitrage (isolation) et de portes, voire portes intérieures complètes réalisées d'un seul tenant ;
- bordures et plinthes en PVC allégé (plus économiques que le bois avec les mêmes avantages de clouage) ;
- gouttières ;
- bardages.

Par ailleurs, les **tubes** n'ont pas encore atteint leur marché potentiel et **pénètreront davantage** dans tous leurs domaines d'emplois, en particulier **pour l'adduction d'eau.** (De plus, les produits étant normalisés, on ne risque pas de réduction d'épaisseur).

A noter encore que le développement de l'**emballage thermoformé** (blisters, barquettes, plateaux à alvéoles), conditionnement éjectable pour produits pharmaceutique, se poursuit.

Des **cartes d'identité** en PVC rigide sont également à prévoir, ainsi qu'une extension de l'emploi des **cartes de paiement.**

Enfin, les **disques microsillon** en PVC/acétochlorure de vinyle, malgré une concurrence des cassettes, connaîtront encore une plus large diffusion.

PVC souple :

On peut s'attendre à une quasi-stagnation relative du PVC plastifié à l'exception du **revêtement mural** (dont l'avenir reste prometteur), car :

- les tissus enduits rencontrent une concurrence du PU qui imite mieux le cuir ;
- l'isolation de câble va vers le PE (ou le PE réticulé) en particulier pour les câbles téléphoniques ;
- dans l'emballage, le film transparent sera remplacé par du film PP (sauf pour l'étirable : viande fraîche) et il en sera de même pour le support de ruban adhésif.

Les nouveaux produits restent rares. On peut citer néanmoins les **conteneurs souples** et les **structures gonflables,** mais leur développement restera faible (recouvrements de piscine, stockage, halls d'exposition, abris temporaires...).

Caractéristiques et usages des autres dérivés vinyliques

	Avantages	Inconvénients	Usages
PVC-C	- résistance thermique accrue - ininflammable	- transparence réduite - fragile au choc	- emballage pour remplissage à chaud (confiture, suppositoire) - tuyauterie d'eau chaude
PVC/ABS Acetate de polyvinyle Acétochlorure de vinyle	- tenue aux chocs - bon état de surface - transformation facilitée	- coût plus élevé - sensible à l'eau	- plaque pour thermoformage - additif, adhésif, peinture
Alcool polyvinylique	- solubilité dans l'eau - insolubilité dans solvants organiques courants - imperméabilité aux gaz et vapeurs		- disque microsillon - colle, adhésif - dose de teinture - protection de semence - films de démoulage - complexes d'emballage
PVD	- très grande imperméabilité aux gaz, vapeurs et arômes - bonne inertie chimique (acides, bases, huiles, graisses) - alimentaire - facilité d'enduction - thermorétractable	- coût assez élevé - attaque par ammoniaque	- étanchéité d'emballage (complexes)

OLEFINIQUES

Préparation

Les processus schématiques du tableau 24 permettent l'élaboration de ces polymères à partir des monomères éthylène ou propylène.

Par copolymérisation, on peut obtenir également les polyoléfines suivants (tableau 25)

On peut obtenir également un polyéthylène de masse moléculaire très élevée (de l'ordre du million), le PEhpm.

Les polyéthylènes peuvent être réticulés chimiquement (peroxydes) ou physiquement (irradiation). On établit ainsi

Tableau 24 — Obtention des polyéthylènes et du polypropylène.

Polymérisation	Ethylène	pression ~ 1000 bars température 150 à 200° C	Polyéthylène basse densité (ou haute pression, ou ramifié)	PEbd
		par mélange PEbd, PEhd ou par polymérisation directe	Polyéthylène moyenne densité	PEmd
		pression 40 à 60 bars température 60 à 120° C + catalyseurs	Polyéthylène haute densité (ou basse pression ou linéaire)	PEhd
	Propylène		Polypropylène	PP

Tableau 25 - Obtention des polyoléfines par copolymérisation.

Ethylène et propylène	Copolymère PP-PE	PPE
Ethylène et acétate de vinyle (20 à 35 %)	Copolymère EVA	EVA
Ethylène, acide acrylique et oxydes métalliques (Ca, Na,... Ba, Ca, Mg, Zn) réticulation ionique	Ionomères	IO
Ou par polymérisation du méthylpentène	Polyméthylpentène	PMP

des liaisons tridimensionnelles au sein de la matiere et le produit n'est alors plus un thermoplastique.

Recemment, on a réalise un PE basse densite par un procede basse pression : **PEbd linéaire.** L'amélioration essentielle concerne la tenue mécanique, d'où la possibilite de réaliser des épaisseurs plus faibles pour une même fonction (gain de matiere), avec cependant, un inconvenient : fluage élevé.

Figure 8 — Structure des polyethylenes

Caractéristiques générales des PE et PP classiques

Utilisations types des PE et PP

PEbd :

- emballage sous forme de gaine ou film : sachets et sacs pour produits alimentaires ou industriels, sacs cabas, sacs poubelles, sacs GC (contenance 50 kg : engrais, farine, sucre, sel...), complexes alimentaires avec papier ou aluminium, films retractables et etirables pour tardelage ou palettisation, capsules de bouchage, tubes de creme souple ;
- films pour batiment ou TP et agriculture (ensilage, paillage, serres-tunnels),
- produits menagers (seaux, poubelles), fleurs artificielles ;
- jouets souples ;
- tuyaux, revêtements de cables telephoniques.

PEhd :

- casiers à bouteilles, caisses de manutention ;
- flacons de detergent et produit d'entretien, bouteilles de lait sterilisé ;
- bidons d'huile à moteur, « jerrycans », fosses septiques.

	Avantages	Inconvénients
PEbd	· souplesse (sans plastifiant) · tenue aux chocs (pratiquement incassable) · inertie chimique (en particulier résistance à l'acide fluorhydrique qui attaque verres et metaux) · imperméabilité à l'eau · alimentaire · coût réduit · moulage et extrusion faciles (large intervalle de temperature) · isolation electrique	· sensibilite à la fissuration sous contrainte · faible tenue thermique, inflammable · oxydation aux UV (sauf coloration noire «carbon black») · permeabilité aux gaz (O_2, CO_2) · destruction par les rongeurs (sauf qualite speciale) · retrait differentiel au moulage · necessite de traitement prealable avant impression · collage difficile, soudure HF impossible
PEhd	· caracteristiques améliorees du PEbd rigidité (ou semi-rigidité) · tenue en température (sterilisable) et au froid · anti-adherence · stabilité chimique et tenue aux radiations · moindre sensibilité à la fissuration sous tension · alimentaire	· combustible · oxydation aux UV · retrait non homogene
PP	· bonne tenue mecanique, rigidité, resistance à l'abrasion · excellente resistance à la flexion (réalisation de charnières minces supportant des millions de manœuvres) · tenue en température élevée (environ 110° C) et conservation de ses propriétés jusqu'à la température de ramollissement · propriétés électriques · bonne resistance chimique et absence de fissuration sous contrainte · bel aspect, brillance, rayure difficile · alimentaire · faible densité (0,90)	· les mêmes que PEhd avec en plus · fragilite à basse temperature, on pallie ceci par utilisation du copolymere PPE · formage plus difficile · nécessite de conformateur pour grosse pièce

- films minces (sacs «sortie de caisse», emballage de viande, de poisson, pochettes internes de disque);
- coques de canot, semelles de ski, cartouches de chasse.

PP:

- ficelles et cordages;
- bandelettes tissées pour sacs TGC (contenance 100 kg: pommes de terre, charbon, sable,...) et pour support de tapis moquette («backing»);
- feuillards de cerclage;
- complexes d'emballage;
- films d'aspect (biscottes, chips, confiserie... bonnetterie) et pelliculage (couvertures de livres et de pochettes de disque);
- coques de siège de plein air ou terrasse;
- pièces techniques pour l'électroménager (machines à laver, sèche-cheveux, aspirateurs) et pour l'automobile (dispositifs de chauffage, filtres à air, bacs d'accumulateur, buses d'aération...);
- boîtage à charnière intégrée (étuis à lunettes, stylos,... poudre, fard,..., boîtiers de pile, malettes...);
- accessoires de salle de bains;
- crayons feutre, cartouches d'encre;
- seringues à jeter;
- chaudronnerie (plaques).

Utilisations en cours ou en développement

PEbd:

Ce matériau est essentiellement lié au **marché du film** et celui-ci est inégal.

Il stagne dans les applications suivantes:

- sacs grande contenance (concurrence du vrac);
- sacs cabas (le marché français reste cependant encore à développer);
- petite et moyenne sacherie, où l'on rencontre la compétitivité du film PP pour le haut de gamme et du film PEhd pour le sac «sortie de caisse».

Mais on peut penser à une croissance dans:

- le film agricole pour les besoins croissants de la plasticulture et le film de TP (sous-couche routière);
- le film dégradable, en particulier pour le film agricole;
- le sac poubelle pour villes à affluence saisonnière et centre des villes anciennes;
- le film rétractable, et surtout, étirable;
- l'application «complexes», le PEbd étant le support le plus utilisé.

Dans d'autres domaines encore, le PEbd se développe (câbles pour PTT, enduction pour tapis d'automobile, couchage de papier photo).

PEbd linéaire:

- films étirables;
- sacherie;
- câblerie.

PEhd:

On peut prévoir d'une façon générale une **croissance du soufflage de corps creux**, mais, corrélativement, une **concurrence du PP dans tous les domaines de l'injection.**

Dans le détail, on peut noter les développements ci-après:

- films minces d'emballage ou de protection (sacherie, pochettes de disque) qui concurrencent le papier;
- isolation de câble électrique (particulièrement PEhd réticulé);
- tubes de gros diamètre (Europe septentrionale, surtout pour l'assainissement) et de moyen diamètre pour l'alimentation en gaz domestique (réseau GDF);
- poubelles urbaines de collecte hermétique et mécanisée pour ordures ménagères;
- gros soufflage de fûts industriels 150 à 250 l, réservoirs d'essence de véhicules automobiles et de fuel domestique;
- planches à voile.

Il reste même encore des possibilités dans l'injection concernant l'activité **manutention** car si les casiers à bouteilles sont en recul, il existe encore de bonnes possibilités dans la réalisation de caisses de manutention d'usage spécifique et de cagettes à fruits ou légumes[4].

De plus, la palette de manutention elle-même, qui ne constitue actuellement qu'un tout petit créneau, sortira probablement de ses limbes (PE allégé par exemple).

Enfin, il existe pour le PEhd encore des opportunités pour les **boîtes de peinture grand public** (1 kg et moins).

PP:

D'une façon globale, on constate:

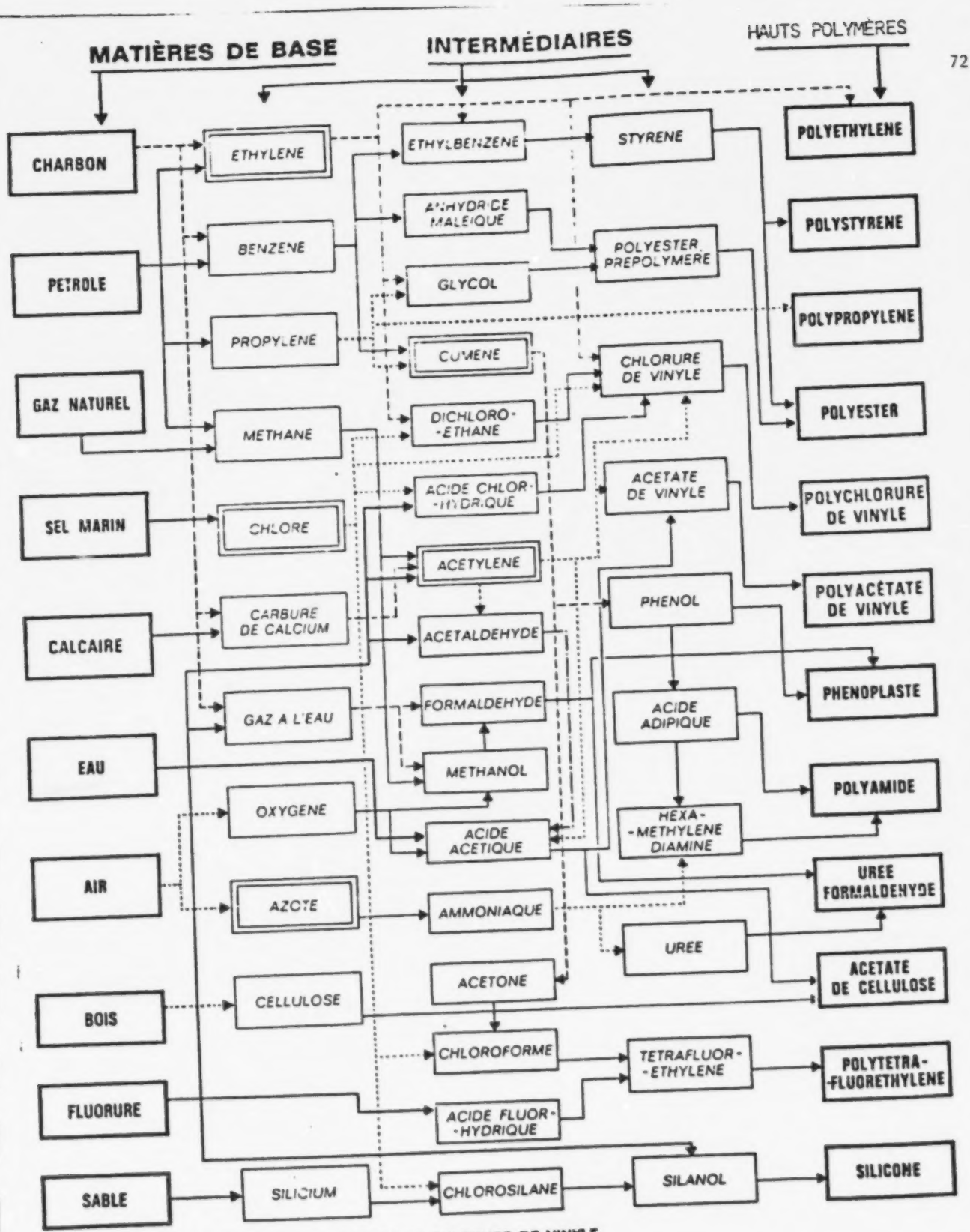
1. Une **très forte croissance du moulage par injection** (reprises sur les autres matériaux PS, ABS et PEhd).

2. Un **développement considérable du film PP dans l'emballage d'aspect**, avec deux types de produits:

- le PP non orienté, qui prend des places sur le PEbd dans la sacherie de bonne transparence;
- le PP biorienté, qui concurrence tous les marchés de la pellicule cellulosique.

Mais la versatilité du PP doit lui permettre de prendre encore des marchés dans les domaines suivants:

- éléments de carrosserie interne d'automobile: garnissage, siège,... obtenus par emboutissage;
- pare-chocs: par association PP - élastomère EPDM;
- tube pour eau chaude, chauffage mural, radiateur (déjà réalisé en R.D.A.) et récupération de l'eau chaude des centrales nucléaires (gros marché possible), voire encore échangeur de capteur solaire;
- corps creux pour jus de fruits et aérosols;
- caisses de manutention;
- manchage d'outils.



NOTA: CERTAINS INTERMÉDIAIRES, TELS QUE LE CHLORURE DE VINYLE, PEUVENT ÊTRE FABRIQUES PAR DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

5 - INSTRUMENTATION

A. Température	-	Thermocouples, régulateurs
B. Pression	-	Capteur avant et après la grille pour vérification de la pression au bout de la vis et dans la filière
C. Puissance	-	Ampèremètre (kilowatts)
D. Vitesse de rotation de la vis	-	Tachymètre
E. Pyromètre à contact ou I.R.	-	
F. Instrumentation et Commande	-	Gestion par ordinateur/blocage du clavier
	-	Tube cathodique/interface par clavier avec imprimante
G. Équipement de post-extrusion	-	Système de refroidissement, air eau
		calibrateur
		chenille
		scie

5.1

De bons systèmes d'instrumentation et de contrôle sont absolument nécessaires pour obtenir un produit extrudé de qualité et pour pouvoir résoudre le plus tôt possible certains problèmes qui peuvent surgir durant la mise en forme.

5.2

Un bon système d'instrumentation devrait avoir:

a) Des régulateurs de température pour le cylindre, la tête et la vis de l'extrudeuse

b) Un indicateur de température de la matière dans la filière (sauf pour le PVC)

c) Un indicateur de charge du moteur (ampérage) et aussi un indicateur de vitesse de la vis (RPM)

d) Des indicateurs d'ampérage pour chaque bandes chauffantes du cylindre

e) Des cadrans de pression avant la filière (quelquefois aussi dans la filière)

f) Un système de refroidissement à l'eau

g) Des boutons poussoirs pour le démarrage du moteur, du système de chauffage, du refroidissement et de la pompe à vide (pour extrudeuse avec évent et vis à deux stages).

5.3 Système de contrôle de la température

Puisque la température influence grandement les propriétés des thermoplastiques (voir chapitre 4), nous allons discuté un peu plus en détail, les différents systèmes de contrôle de la température d'une extrudeuse. Il y a trois principaux types de contrôle, soit réglage manuel, proportionnel et le plus récent, le réglage proportionnel avec intégration et dérivation.

Réglage manuel

Le plus simple et le moins coûteux. Cependant, le réglage et le contrôle ne sont pas fiables. L'écart de variation de la température peut atteindre $\pm$ 50°F (10°C). Voir figure 1.

Réglage proportionnel

Ce type de cadran fonctionne par fréquence variable, c'est-à-dire qu'il donne de l'énergie nécessaire aux bandes chauffantes seulement lorsque la température est plus basse que celle demandée au début. Cette énergie fournie diminue de plus en plus lorsqu'on approche la température demandée mais sans précision. En plus, ce système de réglage ne peut pas compenser pour un changement de bilan thermique (augmentation de la vitesse de la vis, changement de résine, etc.). Voir figure 2.

Réglage proportionnel avec intégration et dérivation

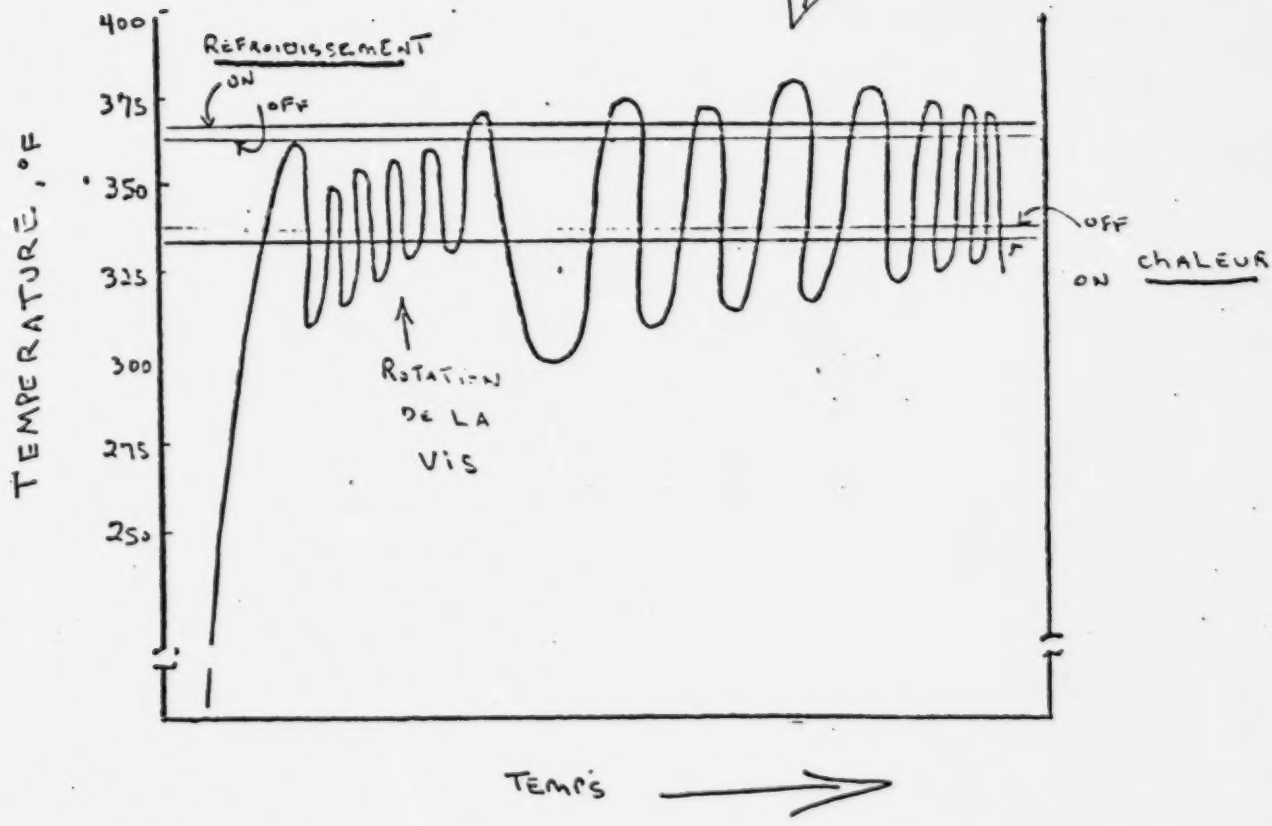
Le meilleur, mais aussi le plus coûteux. Ce système est très précis car il élimine automatiquement les erreurs de statisme (écart de temps entre le signal donné, réponse du thermocouple et signal reçu du système de réglage). En plus, la bande proportionnelle (minimum et maximum de T.) est très étroite car le système anticipe les changements de température du procédé. (voir figure 3).

FIG1

REGLAGE MANUEL (RM)

REGLAGE - MARCHE | ARRÊT

L'AMPLITUDE DES VARIATIONS DÉPEND DE L'ÉCART DE TEMP. ENTRE LE THERMOCOUPLE + L'ÉLÉMENT CHAUFFANT.



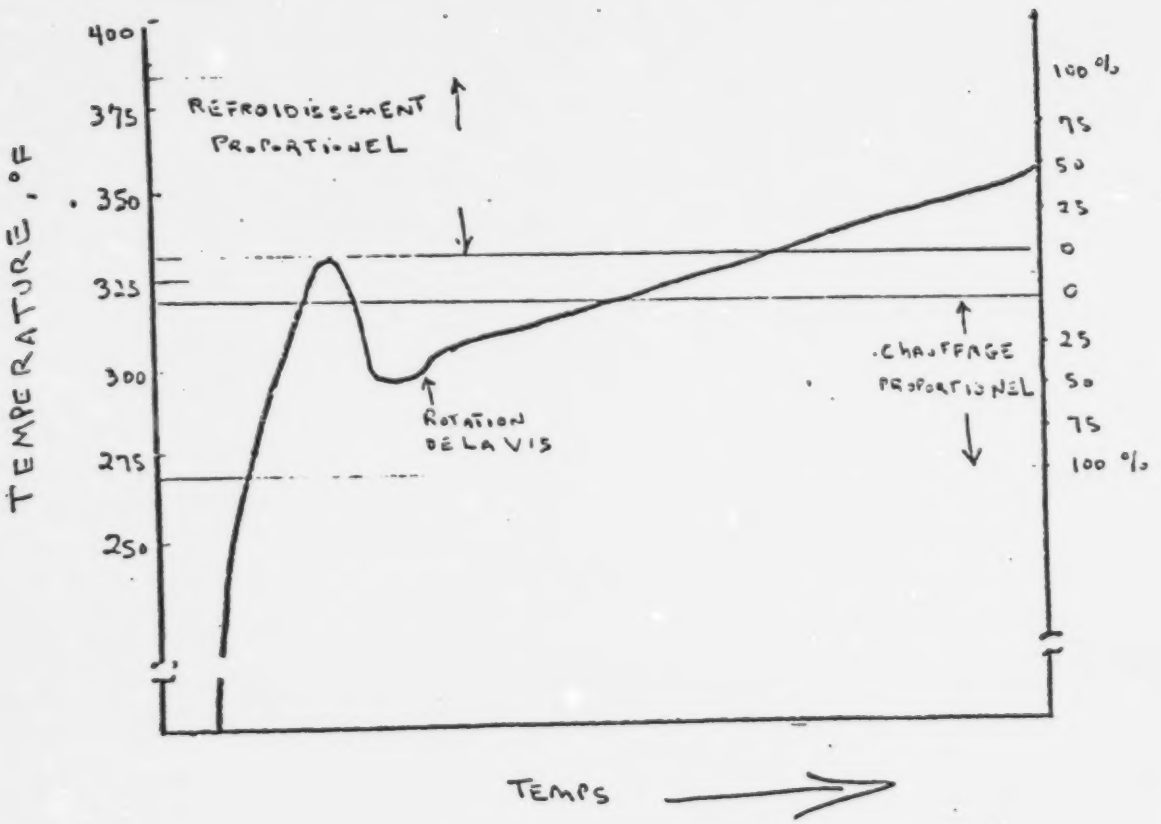
SA FIABILITÉ DÉPEND DU PERSONNEL

FIG. 2

RE GULATEUR PROPORTIONNEL (RP)

PRÉSUPPOSÉ UN RÉGIME PERMANENT

COMMANDE MARCHE/ARRÊT À FREQUENCE VARIABLE

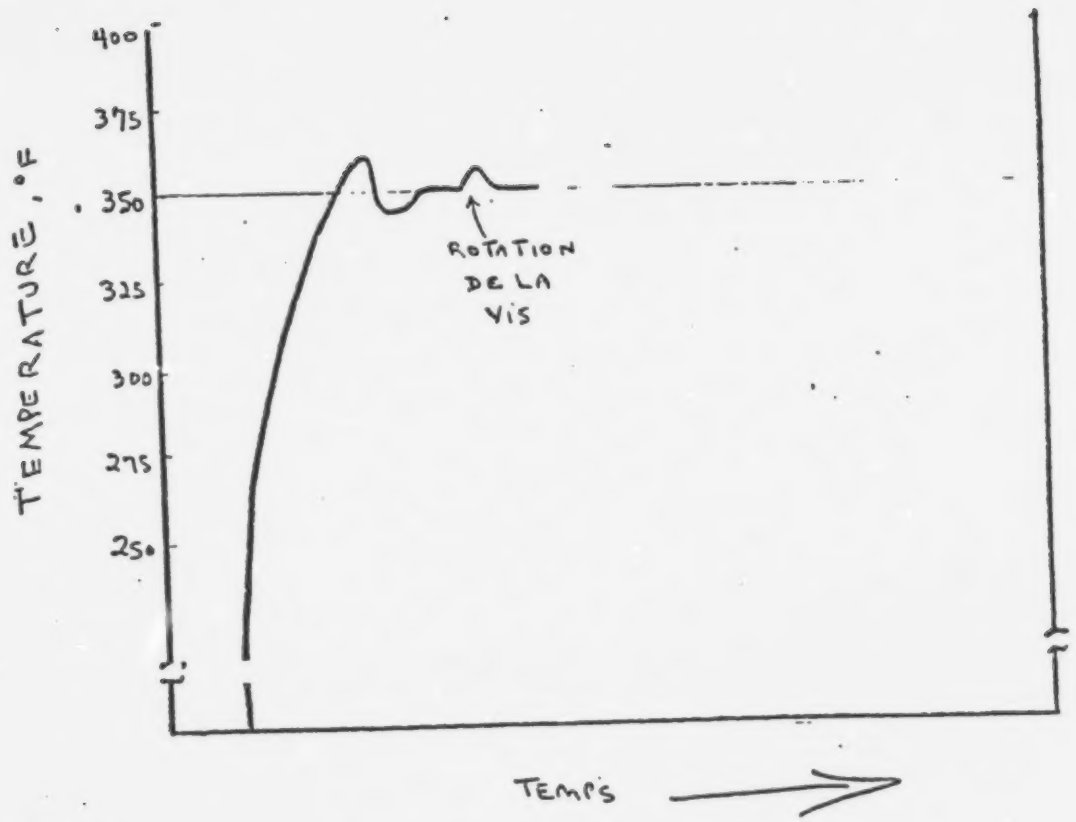


RP. INCAPABLE DE COMPENSER UN CHANGEMENT DE BILAN THERMIQUE

RESULTAT: ÉCART PERMANENT DE LA TEMPERATURE

FIG. 3

REGULATEUR PROPORTIONNEL | INTEGRATION | DERIVATION (PID)



CONTRÔLE PAR -

DERIVATION : DIMINUE LA BANDE PROPORTIONNELLE
RÉDUIT ERREURS DE STATISME
AMÉLIORE LE REGLAGE

. INTÉGRATION : STATISME ÉLIMINÉ, SIGNAL D'ERREUR INTÉGRÉ À ZÉRO.

TABLEAU 5.1

INFORMATION GENERALE - EXTRUSION

Matière	Extrudeuse	Rapport L/D	Taux de compression	Température (entrée) (°C)	Température (tête) (°C)	Température (filière)(°C)	Remarques
PVC souple	Monovis	20 à 30	2	110-130	130-150	150-170	Granulés
PVC rigide	Double vis	15 à 20	2,5	120-140	140-160	160-190	Dry Mix
PVC-C	Double vis	20	2	170	180	205	
Cop CV/CV²	Monovis	12 à 15	2	170	180	200	Refroidir rapidement au dessous de 80°C
Cop CV/AV	Double vis	20	2	110	130-150	150-160	
PS	Monovis	20 à 25	3	160	180	220	
SB	Monovis	20 à 25	3	150	170	220	
SAN	Monovis	20 à 25	3	180	190	220	
ABS	Monovis	20 à 25	3	180	190	220	
ASA	Monovis	20 à 25	3	180	210	230	
PMMA	Monovis	20 à 30	3	180	230	250	
PEBD	Monovis	15 à 20	3	150	180	200	
PEHD	Monovis	20 à 25	3 - 3,5	200	220	240	
PP	Monovis	20 à 25	3	230	250	270	
PB	Monovis	20 à 25	3	190	220	250	
CA	Monovis	15 à 20	2,4 - 3	180	190	225	
CAB	Monovis	15 à 20	2,4 - 3	160	180	200	
CP	Monovis	15 à 20	2,4 - 3	160	180	220	
PA	Monovis	20	2,5 - 3,5	270	250	235	Températures décroissantes

Matière	Extrudeuse	Rapport L/D	Taux de compression	Température (entrée) (°C)	Température (tête) (°C)	Température (filière)(°C)	Remarques
PTFCE	Monovis	20	2-3	290	320	340	
FEP	Monovis	20	2-3	320	350	360	
PVDF	Monovis	25-30	2-3	200	230	250	
ETFE	Monovis	20-25	2-3	260	300	320	
ETFCE	Monovis	20-25	2-3	250	260	280	
PETP	Monovis	20-25	2-3	220	240	250	
PBTP	Monovis	20-25	2-3	250	270	290	
PC	Monovis	20-25	2,5-2,8	290	260	240	Températures décroissantes
Polyacétals	Monovis ou double vis	15-25	2,3-3,5	180	210	220	
PPO	Monovis	25	2,3-3,5	250	280	300	
PSO	Monovis	25	2,5	315	360	370	
PES	Monovis	25	4	315	360	370	Filière à 400 pour les revêtements de câbles

6 . La préparation d'une extrudeuse

. S'occuper du matériel de sécurité individuel: gants, chaussures et lunettes.

. Vérifier si l'on dispose de tout le matériel nécessaire, s'il est aligné au bon endroit et s'il fonctionne convenablement.

. Matériel de diagnostic - pyromètre. jauges et calibres.

. Formules - bon de commande, fiche de préparation, numéro de filière
- fiche de consignation des conditions de fonctionnement

. Masse de matière plastique - qualité, couleur et quantité appropriées.

. Avant d'assembler la filière, vérifier son état et le consigner sur la fiche - il peut exercer une influence sur la qualité du produit.

. Brancher les éléments chauffants

- du cylindre, de la filière
- régler les températures selon les indications de la fiche de préparation
- en l'absence de compteurs, vérifier au toucher le fonctionnement des éléments chauffants accessibles.
- vérifier les compteurs/inscrire si la charge est normale
- vérifier à l'aide des témoins lumineux si les cycles de chauffage et de refroidissement se déroulent normalement

. Vérifier le niveau d'eau dans le système de refroidissement, ou

Vérifier le bon fonctionnement des ventilateurs

. Pendant que l'extrudeuse chauffe, apporter les matières plastiques neuves, les déchets et le mélange-maître de coloration. S'il faut les sécher, commencer suffisamment tôt pour avoir le temps de le faire.

. Nettoyer le broyeur et vider le tiroir; éviter la contamination à tout prix.

. Assembler et installer le matériel de calibrage

- le réservoir d'eau
- le châssis des filières de calibrage à air
- les calibreurs à vide

. Placer les filières de calibrage inférieures dans le châssis

. S' assurer que le dispositif de tirage se trouve à la bonne vitesse/gamme de vitesses.

. Régler la machine de coupe le plus près possible de la longueur voulue.

. Installer les enrouleuses, les contenants, les bobines ou les boîtes.

. Commencer avec la tête ouverte; placer le(s) tamis dans la grille - inscrire l'état de la grille sur la fiche.

. La filière doit être propre.

. Quand les températures augmentent, vérifier si le volet de la trémie d'alimentation (hopper) est fermé, puis remplir la trémie.

. Mettre le moteur en marche et augmenter lentement son régime.

. Ouvrir le volet de la trémie.

. Faire fonctionner l'extrudeuse jusqu'à ce que la matière fondue à la sortie du cylindre ait un bel aspect.

. Arrêter l'extrudeuse.

. Enlever sans tarder mais prudemment l'excédent de matière fondue et installer les tamis et la grille, après les avoir chauffés.

. Fermer et verrouiller le volet.

. Remettre l'extrudeuse en marche et contrôler le manomètre/l'ampèremètre.

. Laisser la matière fondue passer au travers de la filière.

. Pincer la matière fondue pour vérifier la qualité de la coulée.

. Relier les machines à faible débit.

. Amener la vitesse de l'extrudeuse et celle du dispositif de tirage ensemble au régime de production.

. Vérifier les indicateurs de température.

. Régler la vitesse de tirage de façon à obtenir la section voulue.

. Placer les filières de calibrage supérieures dans le châssis.

. Enlever les déchets pour les broyer à nouveau.

. Vérifier toutes les dimensions, la surface, la rectitude, etc.

. Remettre prudemment les déchets dans la trémie.

Arrêt

. Fermer le volet de la trémie

. Retirer les produits acceptables de la table.

. Retirer les filières de calibrage inférieures et supérieures.

. Attendre que la matière fondue cesse de couler

. Arrêter la vis.

. Ouvrir la tête et enlever le bouchon qui s'y est formé.

. Abaisser les températures de la filière, de la tête et de la vis.

. Nettoyer la grille (à l'aide de pinces et d'air comprimé).

. Démonter et nettoyer la filière

. Faire avancer la vis et la nettoyer

. Enduire les filières pour les remiser

. Couper le courant et les alimentations de service de l'extrudeuse

. Broyer les déchets non contaminés et les placer dans des contenants propres clairement identifiés.

LE DEMARRAGE DES EXTRUDEUSES À DEUX VIS

. Nous choisissons une courbe de température qui présente très peu de risques de problèmes.

. Nous choisissons la vitesse la plus basse du doseur; moins il y a de matière fondue dans l'extrudeuse, moins les vis doivent travailler et, par conséquent, moindre est le risque de surcharge.

. Nous choisissons une vitesse lente pour la vis; de cette façon, il n'y aura pas de chocs subits sur les joints quand la matière fondue pénètrera dans la tête-filière. La contre-pression augmentera graduellement, ce qui élimine le risque de fuites au niveau des joints. De plus, pour éviter d'endommager la vis, il ne faut jamais la faire tourner à haute vitesse quand le cylindre est vide.

. Nous contrôlons la charge du moteur pendant que l'extrudeuse fait avancer la matière fondue. Si la charge augmente dangereusement, nous pouvons toujours réduire encore l'alimentation en arrêtant puis remettant en marche par à-coups les doseurs. Toutefois, en règle générale, ce n'est pas nécessaire.

. Nous observons la jauge de contre-pression pour voir ce qui se passe quand la matière fondue atteint la tête.

. Enfin, nous observons la matière au niveau de l'ouverture d'alimentation et de l'orifice de dégazage; si nous constatons qu'après un certain temps, la matière fondue s'écoule normalement, nous pouvons augmenter légèrement la vitesse.

Supposons donc que la masse ait traversé l'extrudeuse et sorte à présent de la filière. Si les charges (celle du moteur et la contre-pression) ne sont pas trop élevées - ce qui est pratiquement certain dans les conditions de fonctionnement décrites ci-dessus - nous augmentons graduellement la vitesse du doseur jusqu'à ce que la charge du moteur atteigne 70% environ. Faire fonctionner l'extrudeuse quelque temps, de façon à ce que le régime se stabilise. Plus la machine est grosse, plus cela prend du temps et plus elle est sensible aux changements.

Le plus important est de ne pas se presser; il ne faut pas précipiter les opérations car cela ne fera que provoquer des problèmes. Ne pas oublier que cette machine est nouvelle pour nous. La prochaine fois que nous l'utiliserons, nous saurons déjà mieux comment elle réagit.

A ce moment, nous tâchons de maintenir les températures aux mêmes niveaux, à moins que ce ne soit totalement impossible, car il est certain que lorsque nous augmenterons la vitesse de rotation de la vis, la quantité de chaleur due au frottement augmentera, particulièrement dans la dernière zone du cylindre (zone no. 5) et au niveau des pointes des vis.

Tout en gardant à l'esprit ce que nous venons de dire, nous augmentons la vitesse des vis et celle du doseur jusqu'au régime de production. Afin de ne pas provoquer de changements subits qui risqueraient d'entrainer des problèmes, nous l'augmentons graduellement. En même temps, nous surveillons la matière de très près, afin de nous assurer qu'elle ne surchauffe pas, ainsi que la charge du moteur et la contre-pression, afin de nous assurer qu'il n'y a aucun danger de surcharge.

Avant de poursuivre, il est essentiel d'expliquer les trois principes fondamentaux suivants:

. La conductibilité thermique du PVC est très basse , ce qui signifie que la chaleur qui y pénètre prend un certain temps pour s'y propager uniformément.

. Les températures de consigne du cylindre et des vis exercent une influence sur la plastification de la matière fondue.

. Les températures de la tête-filière influent sur la qualité des surfaces du produit fini.

(ces deux derniers principes s'infirment légèrement mais, en général, on peut les considérer comme vrais.)

Ne pas oublier que le PVC est un très mauvais conducteur de chaleur. Partant de là,nous pouvons expliquer l'optique dans laquelle nous avons réglé les différentes températures. Pour plastifier la masse, nous devons la soumettre à la chaleur, à des forces de cisaillement et à une pression. Les vis tournantes nous donnent les forces de cisaillement. La pression nous vient de la contre-pression provoquée par la résistance du boisseau étrangleur et de la tête-filière au déplacement vers l'avant de la masse. Quant à la chaleur, elle provient de deux sources, une interne: le frottement, et une externe: les colliers chauffants.

Nous savons que la chaleur que nous introduisons dans la masse prendra du temps pour s'y propager uniformément. Nous savons également que le procédé de plastification provoquera le dégagement de chaleur par frottement que nous voulons contrôler et dont nous comptons tirer profit.

C'est pour cette raison que les réglages de température à l'arrière du cylindre sont plus élevés qu'à l'avant (zone 5). A l'arrière du cylindre, la poudre sèche est encore froide et nous voulons qu'elle chauffe.

Nous savons également que, lorsque la masse commencera à se plastifier, elle résistera aux forces de cisaillement des vis et que c'est cette résistance qui provoquera un dégagement de chaleur par frottement. Cela veut dire que nous devons introduire moins de chaleur extérieure à l'avant du cylindre. Nous pouvons aller plus loin et dire que, dans la plupart des cas, nous devrons éliminer une partie de la chaleur due au frottement, ce qui sera effectué dans le système de refroidissement du cylindre et celui incorporé aux noyaux des vis (circuit d'huile).

Toute chaleur supplémentaire que nous introduirions dans la masse à ce moment n'aurait pas le temps de s'y propager, ce qui entrainerait des différences de température entre les diverses couches de PVC fondu.

Si la température varie, la viscosité aussi. En d'autres termes, la matière fondue ne constituera pas une masse homogène se déplaçant à une vitesse constante, mais bien une série de couches, de viscosité différente, se déplaçant à des vitesses différentes. Pour s'imaginer ce que cela peut donner, l'idéal est d'observer une masse d'eau en mouvement; dès qu'il y a une différence de vitesse, il se produit des vagues ou de la turbulence. C'est la même chose pour le PVC fondu non homogène; les couches se déplacent à des vitesses différentes et il en résulte de la turbulence. Pour résoudre ce problème, nous maintenons assez basse la température dans la dernière zone du cylindre.

Notre optique est légèrement différente pour ce qui est des températures de la tête-filière. Il n'y a aucune force de cisaillement à cet endroit. La matière fondue a déjà été homogénéisée et notre travail se résume à lui donner le profil voulu. Comme le PVC est mauvais conducteur de chaleur, toute la chaleur que nous y introduisons à cette étape n'influe sur la masse que de façon superficielle et c'est exactement ce que nous voulons obtenir. Nous voulons y introduire suffisamment de chaleur pour forcer les derniers lubrifiants extérieurs à remonter vers la surface, afin d'empêcher la masse d'adhérer aux surfaces du canal d'écoulement dans la tête-filière. Ils nous donnent également le brillant voulu du produit fini.

Sur base des principes décrits ci-dessus, nous sommes en mesure, en observant la matière qui sort de la tête-filière, d'élever ou d'abaisser les températures selon les besoins.

En résumé:

. Si la matière n'est pas assez plastifiée, nous élevons les températures à l'arrière du cylindre (zones 1, 2 et 3).

. Nous pouvons voir si la matière fondue s'écoule bien par l'orifice de dégazage. Elle doit être en phase d'agglomérat léger.

. Si la matière fondue obtenue n'est pas homogène (vagues, traces de vis), nous abaissons les températures à l'extrémité du cylindre et celle du circuit de refroidissement des noyaux des vis.

. Si les surfaces sont surchauffées (effet de peau d'orange), nous abaissons les températures dans la tête-filière.

Pendant ce temps, nous avons mis le dégazeur en marche pour aspirer les corps volatils dégagés pendant le procédé.

7. FILIERES

7.1 *Conception pratique de la filière*

Cette notion concerne la construction des filières d'extrusion du commerce ; filières pour lesquelles il faut tenir compte de facteurs tels que : le prix de la filière en fonction de l'importance de la série de production, la facilité de fabrication de la filière et son adaptation éventuelle à la production d'autres profilés, le démontage rapide pour nettoyage et le prix des pièces de rechange.

En outre, la manipulation aisée d'une filière et la facilité d'exécution de certains ajustements comme la concentricité dans le cas d'une filière tubulaire, influencent davantage la qualité commerciale d'une extrusion que la stricte observation des théories de l'écoulement.

En fait la question du coût de la filière en fonction de l'importance de la série de production est si importance que de nombreux extrudeurs fabriquent couramment des filières pour profilés spéciaux à partir de plaques planes en portant leur attention sur la géométrie de l'entrée. Ils sont conscients que la dégradation du polymère se produit dans des zones de stagnation, mais la stabilité thermique des matériaux actuels est telle que la quantité désirée de profilés est terminée ou presque — avant que cette dégradation ne soit importante. De toutes façons, lorsqu'on a affaire à des filières de construction simple, il est facile d'effectuer un démontage en vue du nettoyage, et un redémarrage [illegible].

Dans le cas des filières pour tubes, films tubulaires, feuilles et autres produits de dimensions standard, la principale préoccupation concerne de longues séries sans nettoyage et ceci une exige observation serrée du circuit d'écoulement, dont on discutera plus en détail au paragraphe suivant.

7.2 Restriction de la filière.

La figure 1 est une illustration schématisée d'une filière type d'extrusion pour la fabrication de tubes avec toutes les caractéristiques diverses importantes.

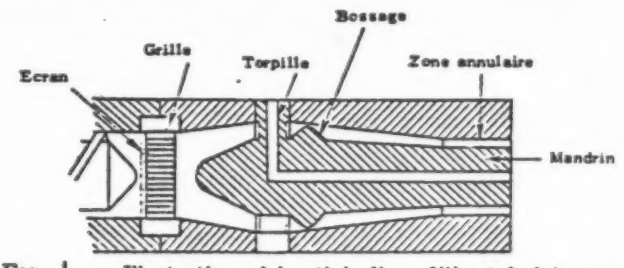


FIG. 1 — Illustration schématisée d'une filière tubulaire type.

En allant à contre courant, la filière comprend une grille supportant un écran dont la finesse est variable selon la matière et les conditions opératoires, un mandrin supporté par des ailettes et une filière annulaire extérieure qui, bien que cela n'apparaisse pas sur le schéma, peut être ajustée latéralement par rapport au mandrin de façon à obtenir la concentricité du produit final. La portion parallèle terminale du mandrin constitue, avec la filière annulaire extérieure, l'appui ou l'anneau de la filière.

Outre sa fonction de conférer au produit extrudé une forme et des dimensions déterminées, la filière doit, dans ses différentes parties, opposer une résistance à l'écoulement et engendrer ainsi dans les systèmes une contre-pression.

L'ensemble grille /écran assure la pression dans la vis de la boudineuse, ce qui permet à la matière d'être travaillée, cisaillée et convenablement homogénéisée. On peut obtenir le même effet en utilisant des portées coniques réglables à l'extrémité de la vis ou des valves spéciales, dont on parle ailleurs. La contre-pression due à la restriction dans la zone annulaire est destinée à comprimer la matière avant la grille en écoulement homogène.

Dans le cas de filières tubulaires droites ou d'autres systèmes d'extrusion nécessitant des obstructions à l'écoulement de la matière, il faut non seulement canaliser le flot en un seul courant, mais éliminer les profils défectueux de vitesse dûs à ces obstructions, (figure 2 *a*). Si la restriction avant la torpille est insuffisante ou

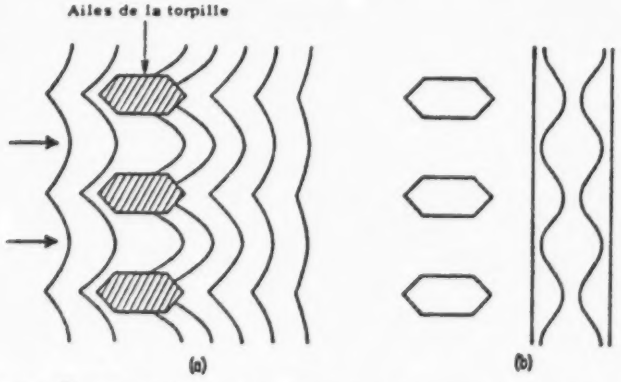


FIG. 2. — Profil de la vitesse dans la zone de la torpille.

mal placée. les inégalités de vitesse entraînent des défauts longitudinaux dans le produit fini appelés *lignes de torpille*, qui outre le mauvais aspect qu'elles occasionnent, sont des lignes de faiblesse risquant de faire éclater le produit en service. En général la seule restriction de la zone annulaire ne suffit pas pour corriger ces troubles de vitesse et il faut prévoir d'autres expédients. Ainsi, de nombreuses filières tubulaires ont un bossage prévu dans le mandrin constituant une restriction locale avant la torpille, comme on peut le voir sur la figure 3 . S'ils sont correctement

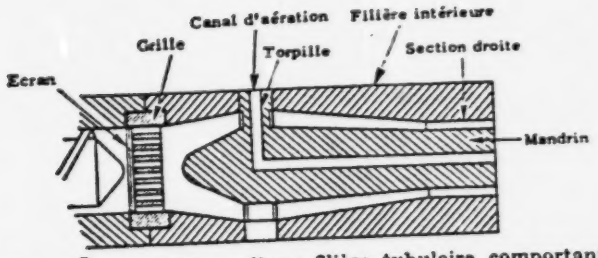


FIG. 3. — Schéma d'une filière tubulaire comportant un anneau de restriction.

placés et conformés, de tels dispositifs sont très efficaces pour éliminer les inconvénients précités. La forme de bossage peut être étudiée pour qu'il présente une restriction moindre en regard avec les différents éléments de la torpille (figure 2 *b*).

Les brèves indications générales ci-dessus relatives aux diverses formes de systèmes restrictifs, n'ont pas tenu compte de la matière mise en œuvre, mais il est évident que, d'après les relations développées antérieurement, la viscosité a une influence considérable sur les dimensions de ces systèmes. Par exemple, un dispositif pour lequel la longueur et la largeur de l'espace compris le bossage et la paroi adjacente ont une valeur déterminée, fonctionnera convenablement avec une matière de viscosité élevée, telle que le p.v.c. non plastifié, et aura par contre peu d'effet si on l'utilise avec un polyéthylène de basse densité à la même cadence. C'est pourquoi les dimensions du dispositif de restriction doivent être, dans la mesure du possible, réglables ou interchangeables.

Finalement, bien que cela ne concerne pas directement ce problème de restriction, il est peut-être opportun d'introduire à ce stade la notion de relaxation dont on a déjà discuté plus haut à propos du « fractionnement de la matière » et qui est un facteur important pour la localisation des divers éléments de la filière, y compris les systèmes de restriction.

Il est bien connu que les polymères fondus sont, dans la plupart des cas, non seulement visqueux mais très élastiques. C'est cette élasticité qui provoque des gonflements de l'extrudat à la sortie de la filière et qui est également partiellement responsable des lignes de torpille mentionnées plus haut. Le polymère fondu ayant été soumis à différentes vitesses de cisaillement à travers les profils disturbés de vitesses entre les éléments d'obstruction, arrive à l'orifice de la filière dans un état non uniforme que la zone annulaire ne peut corriger. Il faut alors non seulement établir une contre-pression à l'aide de systèmes restrictifs, mais donner au polymère le temps de se détendre au cours de son passage à travers le canal de la filière, après avoir contourné un élément d'obstruction. Ceci signifie que l'entrée de la filière doit être située bien avant la torpille ou tout autre système de restriction et on a souvent constaté que, pour les filières tubulaires, cette distance doit être au moins égale au double du diamètre de la torpille. Evidemment, la distance minimale réelle entre l'élément d'obstruction et la zone annulaire est déterminée par les caractéristiques de cet élément, la vitesse linéaire de la matière à travers le canal avant l'obstruction, et par les propriétés du polymère fondu.

ECOULEMENT LAMINAIRE DANS UNE FILIERE

TUBE

$$Q = \frac{\pi PR^4}{8VL}$$

$$\text{VITESSE} = \frac{PR^2}{8VL}$$

CANAL RECTANGULAIRE

$$Q = \frac{PAE^3}{LKV}$$

$$\text{VITESSE} = \frac{PE^2}{LKV}$$

Q = DÉBIT, MASSE VOLUMÉTRIQUE PO^3/SEC

V = VISCOSITÉ, $LB\text{-}SEC/PO^2$

P = PRESSION, LB/PO^2

L = LONGUEUR, PO

A = LARGEUR

E = EPAISSEUR

K = DÉPEND DU RAPPORT $\frac{A}{E}$

R = RAYON

SI LA PRESSION EST DOUBLÉE, LE DÉBIT EST DOUBLÉ.

SI LA LONGUEUR EST DOUBLÉE, LE DÉBIT EST RÉDUIT DE MOITIÉE.

SI LA VISCOSITÉ EST DOUBLÉE, LE DÉBIT EST RÉDUIT DE MOITIÉE.

SI LE RAYON (TUBE) EST DOUBLÉ, LE DÉBIT AUGMENTE 16 FOIS.

SI L'ÉPAISSEUR (RECTANGLE) EST DOUBLÉE, LE DÉBIT AUGMENTE 8 FOIS.

FIG 4

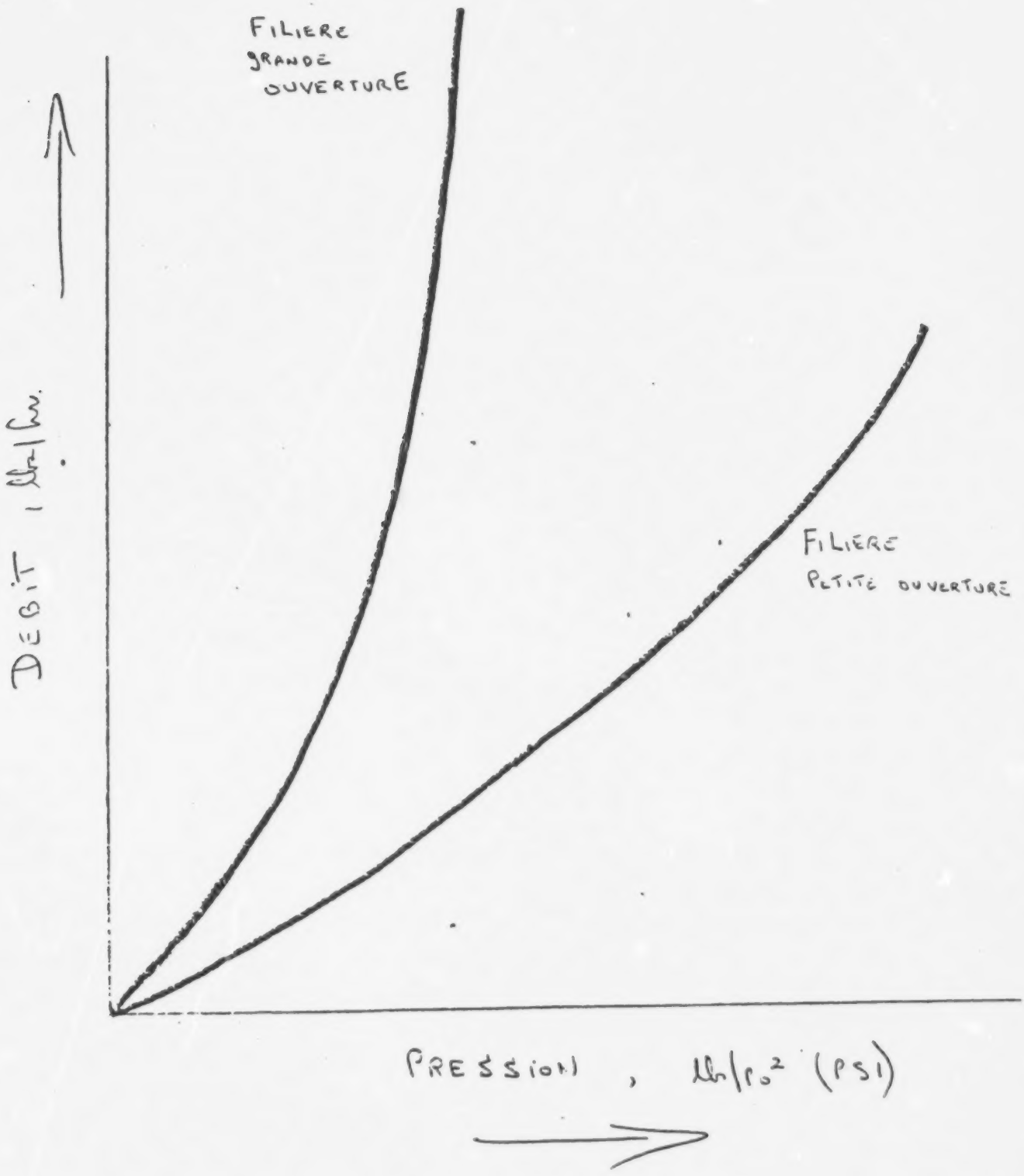

FILIERE
GRANDE
OUVERTURE
FILIERE
PETITE OUVERTURE
DEBIT , lbm/hr
PRESSION , lbm/in² (PSI)

FIGURE 5

ECOULEMENTS A TRAVERS UNE FILIÈRE

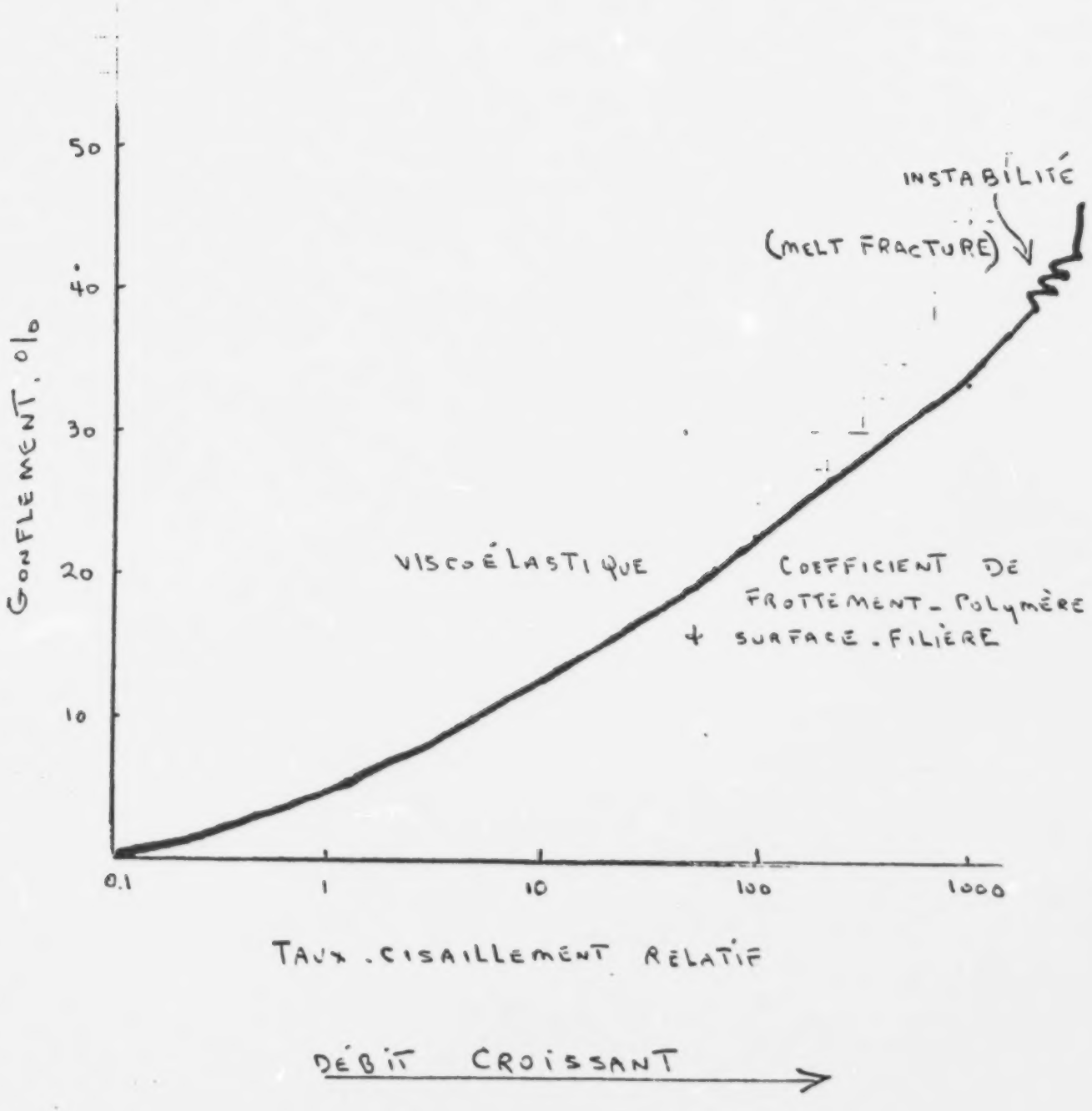
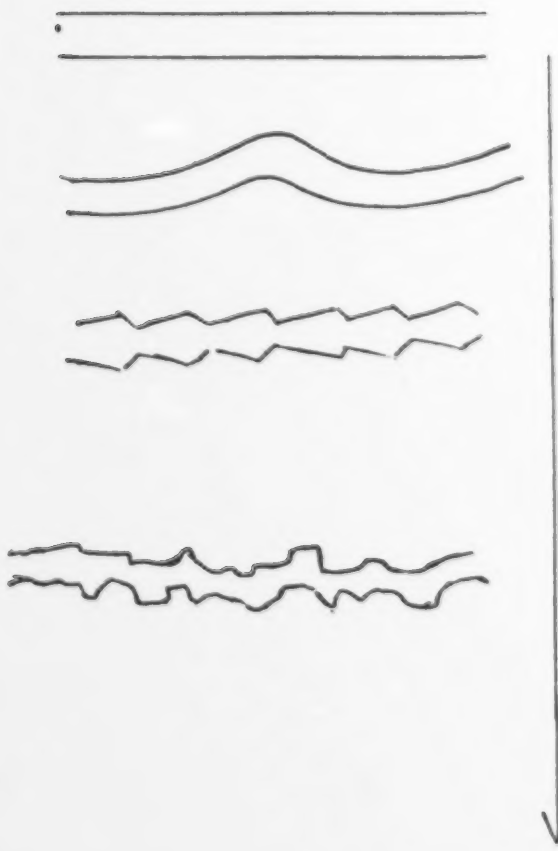


FIGURE 6

INSTABILITE DES ECOULEMENTS VISCOELASTIQUES

ECOULEMENT DU POLYMÈRE FONDU À
TRAVERS UNE FILIÈRE



EXTRUDAT NORMAL

FORME HÉLICOÏDAL

DÉFAUTS EN BAMBOU

ÉCOULEMENTS CHAOTIQUE

DEBIT CROISSANT

7.3 – Filières tubulaires.

Les figures 7 et 8 montrent des filières droites pour l'extrusion de tubes en matériaux rigides ou semi-rigides, et les figures 9 et 10 schématisent respectivement des filières en tête d'équerre et offset.

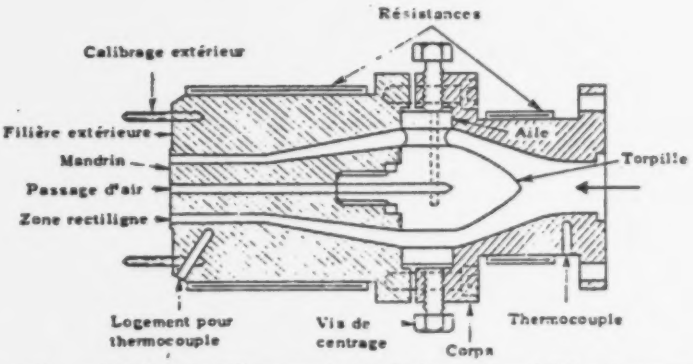


FIG. 7. — Schéma de filière pour tubes de dimensions faibles et moyennes.

On voit que la filière droite consiste essentiellement en un corps de filière supportant la structure principale et en une bague extérieure et un mandrin donnant ensemble les dimensions de l'orifice. Le mandrin prend appui sur des ailes s'adaptant dans une enclave du corps de filière où il peut être solidement fixé. On réalise le réglage de la concentricité du tube à l'aide de vis de centrage qui agissent sur l'aile et le mandrin, comme on peut le voir sur le schéma de la filière la plus petite, ou en faisant bouger la bague extérieure par rapport au mandrin fixe — voir les autres illustrations. Dans ce dernier système, qui est le plus fréquemment employé, les vis d'ajustage portent sur la bague extérieure enclavée dans le corps de filière et sont fixées par un anneau de serrage distinct. Le mandrin fixe et la pièce à ailes conduisent à une construction plus rigide, essentielle pour les tubes de grand diamètre.

Un trou d'air est foré au centre du mandrin et correspond avec un autre trou aménagé au centre d'au moins une aile de la torpille. A son tour, ce trou est relié à une unité de débit constant et réglable d'air comprimé qui est envoyé continuellement à

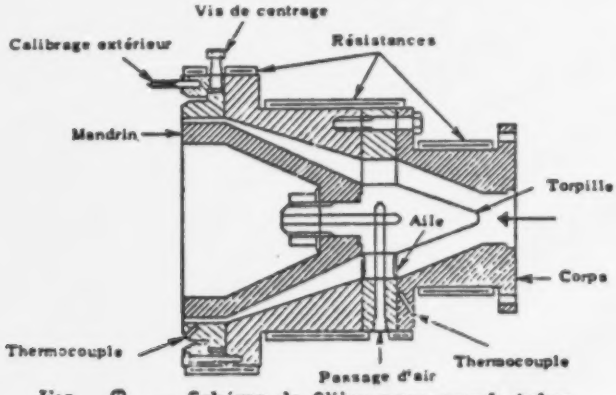


FIG. 8 — Schéma de filière pour grands tubes.

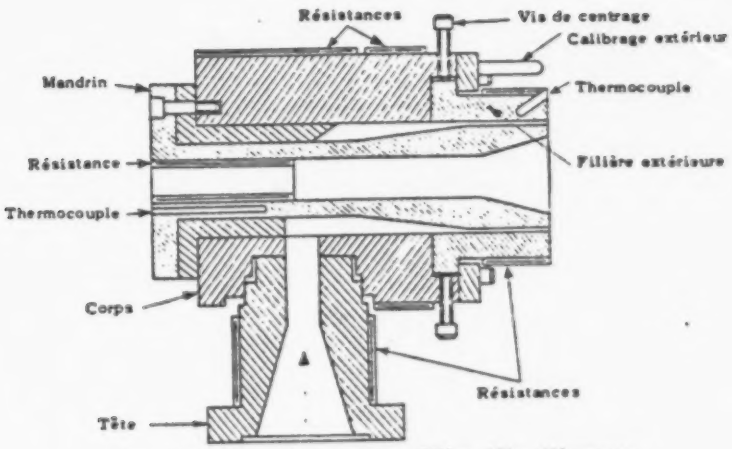


FIG. 9. — Schéma d'une filière tête d'équerre.

l'intérieur du tube extrudé. L'extrémité de l'aile a elle-même la forme d'une torpille qui guide la matière à travers les passages et facilite l'uniformité de son écoulement. L'appui à ailes est généralement conçu pour recevoir une gamme de mandrins de dimensions variées pouvant ainsi produire des tubes de diamètres différents.

Des bandes chauffantes sont fixées autour du corps de filière et de la filière extérieure, et des thermocouples sont prévus pour la régulation de la température. Sur certaines filières de grand diamètre on insère dans le mandrin une résistance cartouche

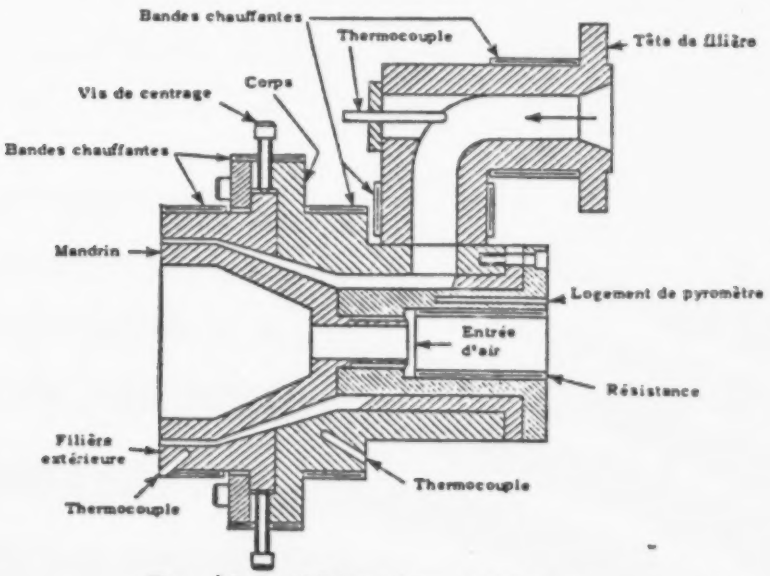


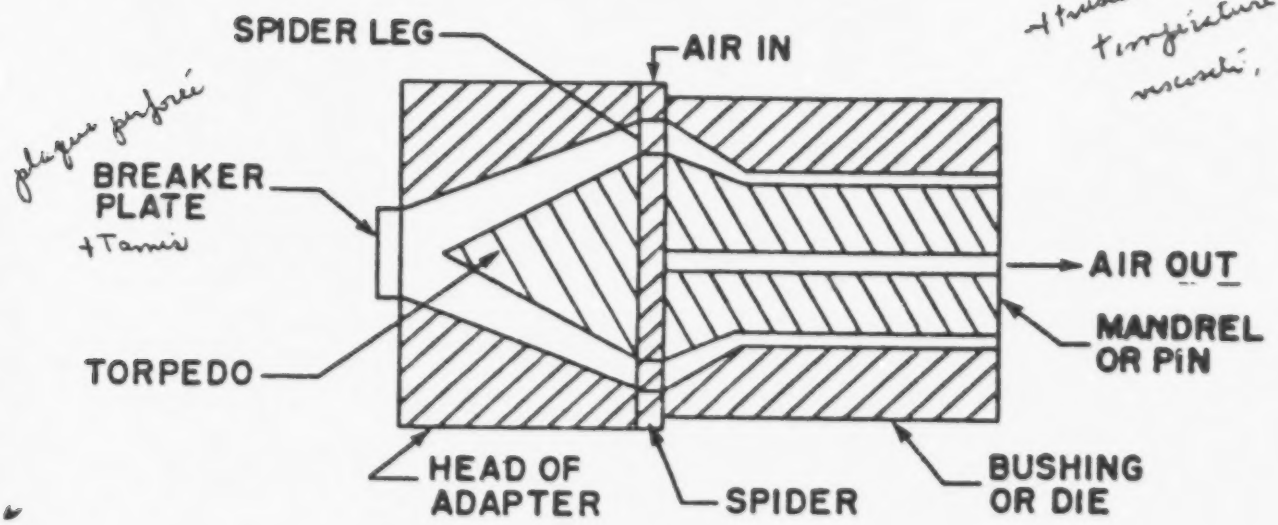
FIG. 10 — Schéma d'une filière offset.

de façon à chauffer les parois intérieures de la filière. Cette disposition n'est pas très commode, mais elle recueille de plus en plus de faveur dans le cas des filières tête d'équerre et surtout offset.

On voit sur les schémas que les filières tête d'équerre et offset comportent aussi un corps avec une bague extérieure, ainsi qu'un mandrin, mais, étant donné l'alimentation latérale, pas d'appui à ailes. La facilité d'accès au mandrin pour le chauffage ou le refroidissement, ou pour d'autres opérations comme la fixation des mandrins de calibrage refroidis à l'eau, est comme on le verra plus tard, indiscutable.

FIGURE 11
PVC PIPE EXTRUSION DIES

LOW-SHEAR DIE



HIGH-SHEAR DIE

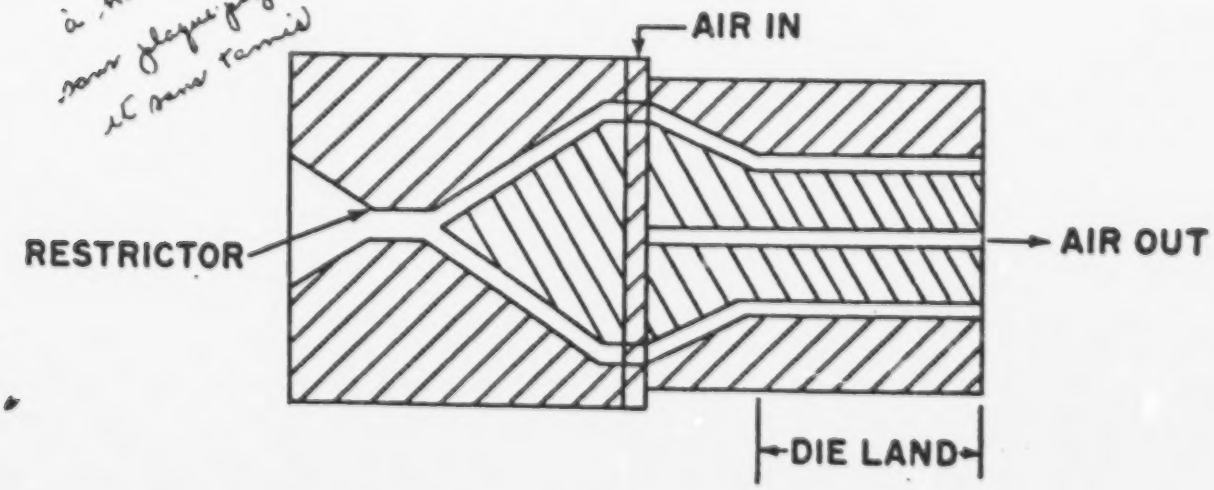
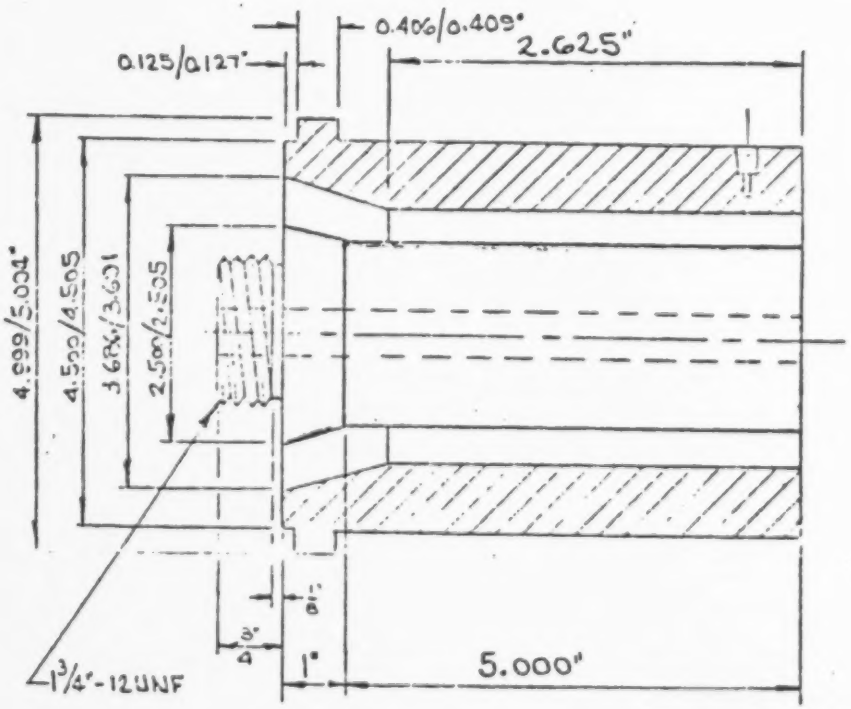


FIG. 12

-1"-75 PSI "CSA & NORPIPE"- PE. BD



CSA:
ID = 1.049"
OD = 1.273"
WALL = 0.108" @ 0.116"
IDEAL WALL = 0.112"

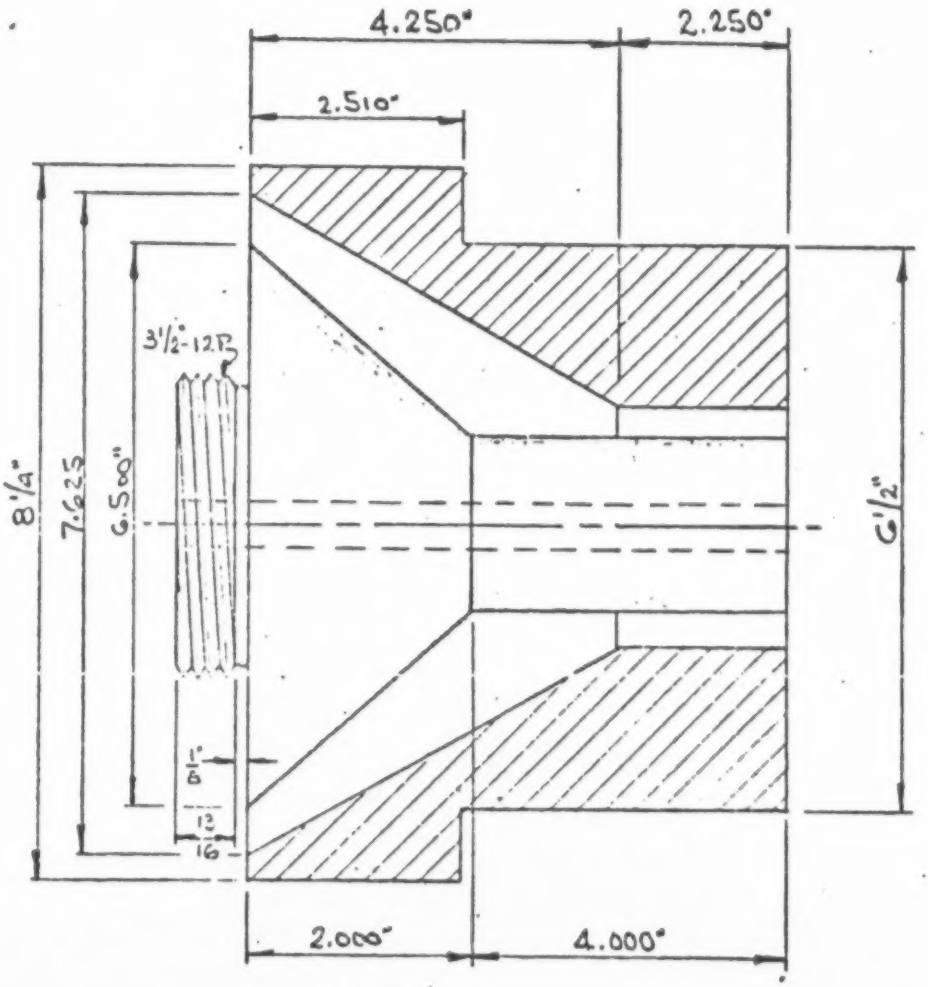
NORPIPE:
ID = 1.049"
OD = 1.277"
WALL = 0.108" @ 0.116"
IDEAL WALL = 0.114"

SLEEVE ID = 1.335"
BUSHING ID = 1.565"
PIN OD = 1.280"
SLEEVE = 104.9% OD PIPE

USED ON M/C # 1 & 2
WITH DFDY-6011 "CSA".
UB-1 "NORPIPE"

FIG 13

-2" ABS-DWV-



PIPE DIM:
ROUNDNESS = 2.368" @ 2.392"
AVERAGE OD = 2.375" @ 2.395"
WALL THK = 0.154" @ 0.175"

SLEEVE ID = 2.423" X 6" LG.
BUSHING ID = 2.625"
PIN OD = 2.250"
SLEEVE = 101.6 % OD PIPE.

USED ON M/C # 4
WITH LL-4113

TABLEAU 2

CONCEPTION - FILIERE - TUYAUX

GUIDE GENERAL

		PP	PEBD	PEHD	PVC *
RAPPORT:	LONGUEUR - ZONE PARALLÈLE / PASSAGE - POLYMÈRE (a)	30/1	20/1	25/1	20/1
RAPPORT D'ETIRAGE	ϕ INTÉRIEUR - FILIÈRE / ϕ EXTÉRIEUR - TUYAU		2/1	MAXIMUM	
ETIRAGE MAXIMUM	PASSAGE - POLYMÈRE / EPAISSEUR - TUYAU		2.5/2	MAXIMUM	

* 25-30/1 TUYAUX ÉPAIS

surface de la filière : chromé

(a) épaisseur des tuyaux

7.4 — Filières pour profilés rigides.

Les filières pour l'extrusion de profilés rigides sont en général de conception semblable à celle des filières pour tubes mais plus simples en ce sens qu'il n'existe aucun des problèmes associés aux mandrins et aux appuis. De telles filières comportent simplement une portion d'alimentation, ou une tête, fixée à la boudineuse et une plaque de filière interchangeable dans laquelle le profilé est découpé et mélangé à l'entrée pour correspondre avec la sortie de la portion d'alimentation.

Les filières pour l'extrusion de joncs solides peuvent être considérées comme des filières pour tubes dans lesquelles on a omis les mandrins et les appuis, et on a prévu une longueur de

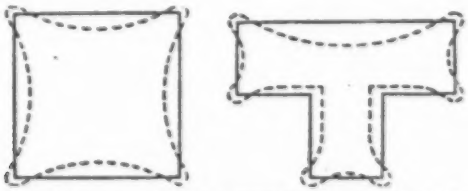


FIG. 14. — Schéma montrant en pointillés la forme grossière de la filière nécessaire pour obtenir les profilés présentés en traits pleins.

séjour suffisante pour établir la contre pression requise. Etant donné le tirage superficiel sur la matière traversant la filière et, par ailleurs, du fait de la nature parabolique du profil de la vitesse d'écoulement dont on a fait mention plus haut dans ce chapitre, l'écoulement a tendance à être plus fort dans les parties plus épaisses de la filière que dans les plus minces. C'est pourquoi l'orifice de filière doit avoir une forme spéciale pour contrebalancer cette tendance et sa forme est rarement semblable à celle du profilé obtenu. Sur la figure 14 les lignes pleines indiquent la forme du profilé désiré et les lignes en pointillé montrent approximativement la forme de l'orifice de filière nécessaire pour obtenir le même profilé. On notera qu'il faut prévoir une augmentation de matière dans les coins où se produit l'effet de frottement superficiel à partir des deux faces perpendiculaires. On peut également faire varier la longueur de séjour dans les différentes parties de la filière et même associer cette variable avec des réglages d'orifice pour obtenir un profilé déterminé.

...à la figure 14, il est évident qu'un profilé complexe, important des épaisseurs, des coins et des angles variés, offre des difficultés considérables et serait impossible à concevoir à partir d'une théorie de l'écoulement. La méthode usuelle consiste à fabriquer une plaque de forme indéfinie et à arriver par approximation au profilé désiré. Une ou deux tentatives intéressantes pour activer cette procédure ont été suggérées . Pour des profilés compliqués on peut aussi partir d'une matrice coulée en métal mou en utilisant un plâtre positif du profilé désiré. On fixe ensuite cette matrice dans un support convenable et on s'en sert pour des essais d'extrusion. Le métal mou peut être facilement façonné si des ajustements sont nécessaires et la filière molle définitive est utilisée pour des courtes séries. Dans le cas d'une série importante, à partir de cette filière on en fabrique une autre en acier.

Il faut normalement effectuer un certain étirage des profilés lorsqu'ils sortent de la filière pour éviter qu'ils ne fléchissent et l'on règle la vitesse d'étirage. C'est pourquoi le profil de filière doit être de dimensions un peu supérieures à celles du profilé désiré. Toutefois, cet étirage provoque des contractions inégales dans une section variable étant donné que les parties épaisses tendent à moins se réduire que les parties minces. Par exemple, une bande plate de matière s'amincit davantage dans son épaisseur que dans sa largeur. Aussi faut-il prévoir une certaine latitude au moment de la conception de la filière. (VOIR FIG. 15 @ 18)

7.5 — Filières pour l'extrusion multicouleurs ou multimatières.

co-extrusion

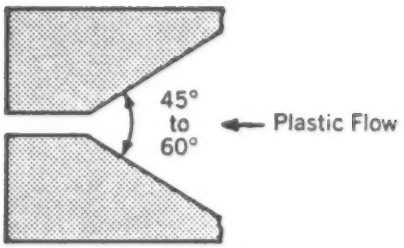
Il est évident que si une filière comporte deux ou trois orifices reliés à des canaux séparés disposés de façon à converger juste au-dessus de la zone rectiligne, et si ces orifices concernent des boudineuses distinctes alimentées avec des matières différentes, il en résulte une multi extrusion. Cette disposition ne présente pas de difficultés spéciales, si ce n'est sa structure d'écoulement interne compliquée et si les matériaux utilisés sont compatibles entre eux, on aura une bonne adhésion des différentes parties.

VOIR FIG 19+20

Naturellement, il faut contrôler soigneusement les débits des diverses sources d'alimentation de façon à avoir une production uniforme du profilé. Il est parfois nécessaire également d'ajuster la position de convergence des canaux pour réaliser un compromis entre une bonne adhérence et une ligne de soudure nettement limitée.

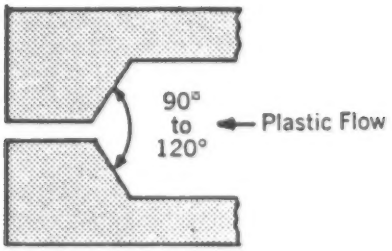
FIG.15 TÊTE DE LA FILIÈRE

EXEMPLES TYPIQUES



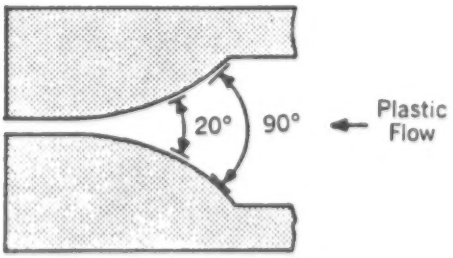
Common, Simple to Make

bon



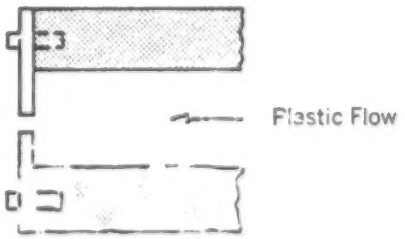
Large entrance angle may cause material stagnation and/or melt fracture.

mauvais



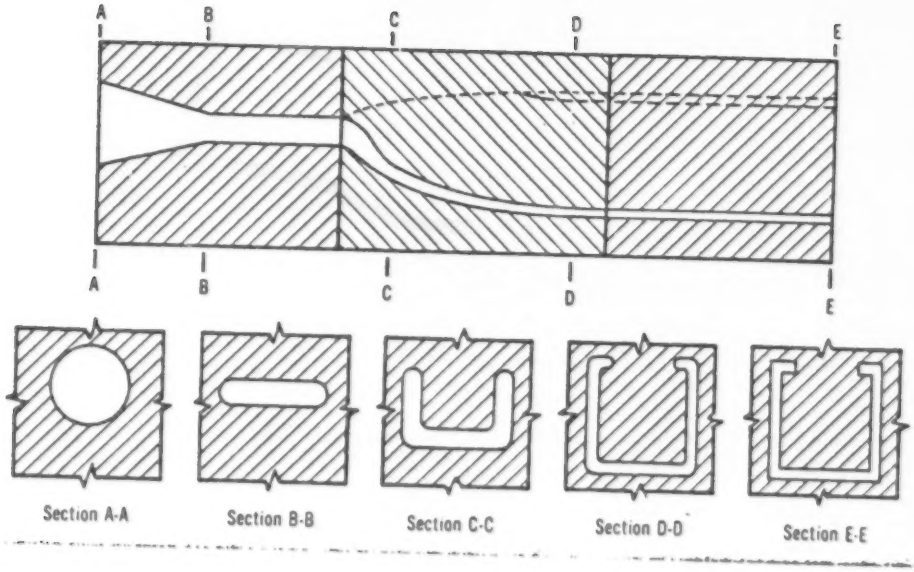
Best, but is the most expensive. Streamlined approach inhibits stagnation, and small angle (20°) at the beginning of parallel land allows high speed exits without melt fracture.

meilleur
mais plus coûteux



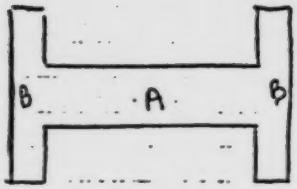
seulement pour
essais préliminaires

FIG. 16 FILIÈRE - EXTRUSION A HAUTE VITESSE



FILIÈRE

FIG. 17

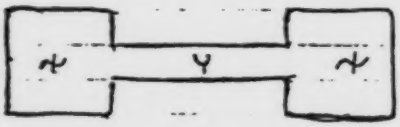


ÉCOULEMENT DE LA MATIÈRE :

$A > B$

ONDULATION - SECTION A

DÉCHIREMENT - SECTION B



ÉCOULEMENT DE LA MATIÈRE :

$y < x$

RÉDUCTION DE LA LARGEUR y

DÉCHIREMENT. SECTION x, PERPENDICULAIRE A L'ÉCOULEMENT

FIG. 18

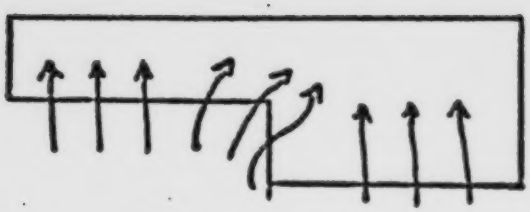
FILIERE

RAPPORT - LONGUEUR (A) / ÉPAISSEUR	L/E		
ABS	5		
NORYL	10		PROFILÉS
PVC RIGIDE	10 - 15	MONOVIS	
	15 - 20	BIS-VIS	
	20	MONOVIS ET BIS-VIS	TUYAUX
	25 - 30		TUYAUX ÉPAIS

(A) ZONE PARALLÈLE

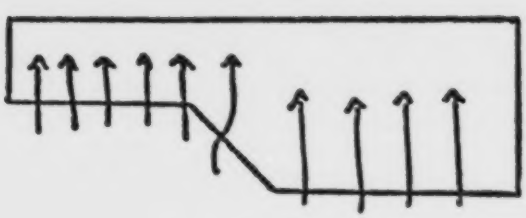
FIG. 19

FILIERE



MAUVAISE DIRECTION DU PVC FONDU

PROFILÉS
EPAISSEURS
VARIABLES



RÉPARTITION DE L'ÉCOULEMENT DU PVC FONDU

AUSSI POUR
CO-EXTRUSION

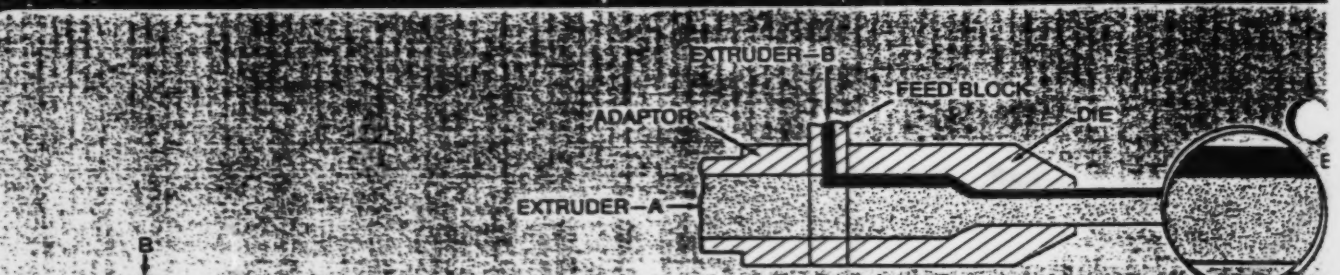


FIGURE Single Side Block (BA)

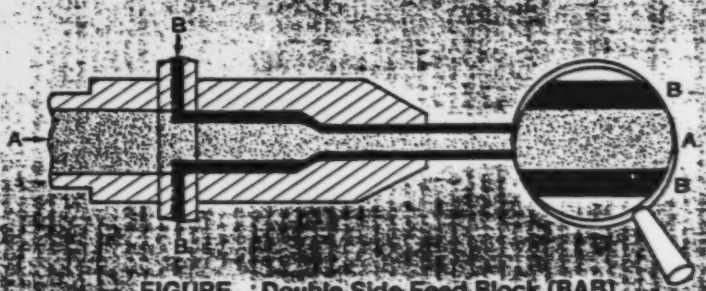


FIGURE Double Side Feed Block (BAB)

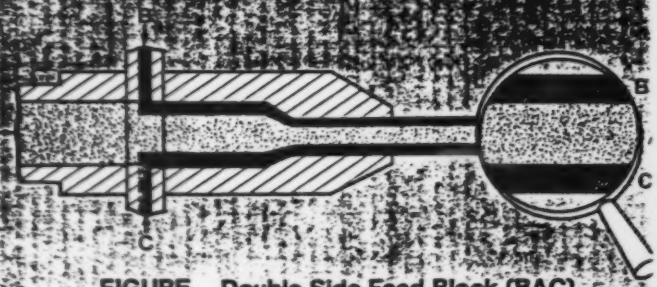


FIGURE Double Side Feed Block (BAC)

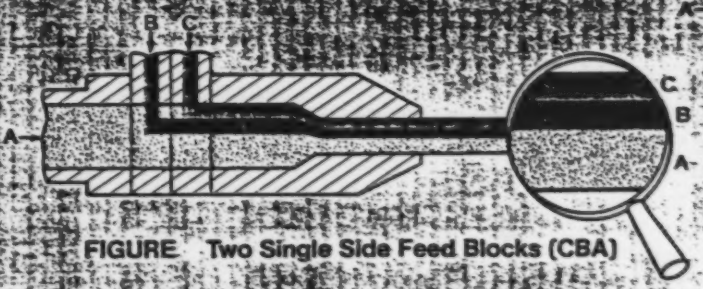


FIGURE Two Single Side Feed Blocks (CBA)

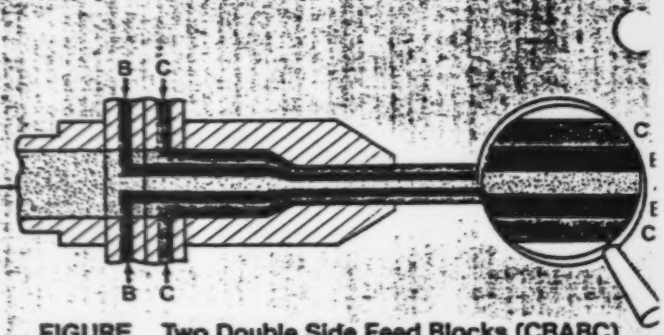


FIGURE Two Double Side Feed Blocks (CBABC)

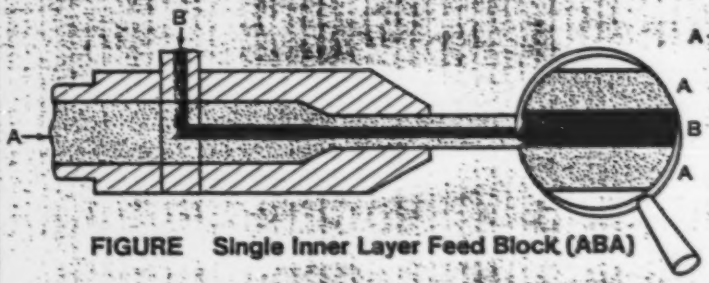


FIGURE Single Inner Layer Feed Block (ABA)

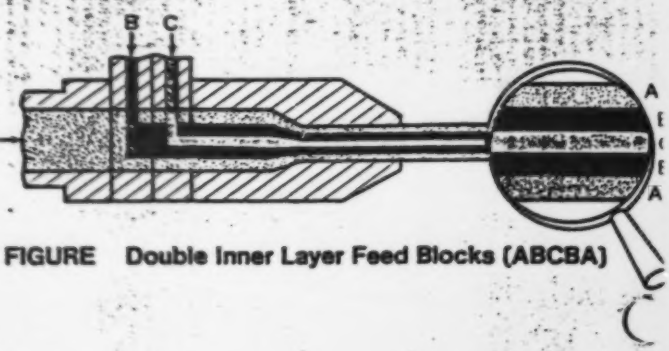


FIGURE Double Inner Layer Feed Blocks (ABCBA)

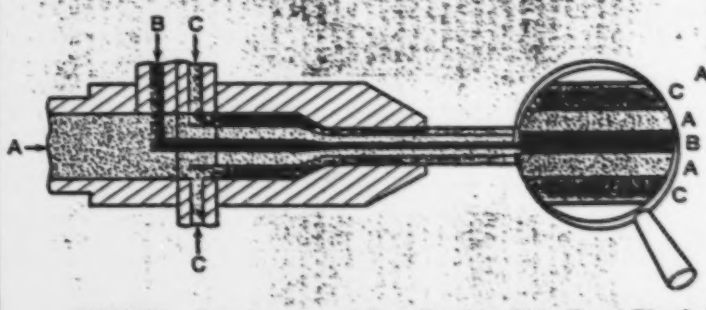


FIGURE One Inner and One Double Side Feed Block (CABAC)

7.5 FILIERES POUR L'EXTRUSION DES FEUILLES

TETE ET FILIERES*

A la sortie de l'extrudeuse, l'extrudat de matière fondue entre dans la filière plate qui lui donne la section transversale désirée. Des plaques d'épaisseur moyenne peuvent être extrudées en largeur, jusqu'à 3 m. La distribution uniforme du produit fondu et l'établissement d'une

* *D'après H. Eigruber (Documentation Krauss-Maffei)*

vitesse d'écoulement uniforme sur l'entière largeur de la filière sont des tâches difficiles. Ce problème est résolu par une configuration du canal de distribution qui facilite l'écoulement de la matière en largeur et par l'emploi d'un dispositif de refoulement qui augmente la résistance à l'écoulement au centre de la filière. Ceci n'aboutit cependant pas encore à un écoulement uniforme sur l'entière largeur de la filière. C'est pourquoi les filières sont munies d'une barre de retenue, qui peut être ajustée durant l'extrusion et qui permet de régler l'écoulement en fonction des nécessités. La barre de retenue est faite en matériau flexible, la largeur de la fente s'ajustant au moyen de vis de tension et de pression. L'ajustage de la fente de sortie se fait par déplacement des lèvres de la filière. Pour pouvoir observer les tolérances d'épaisseur requises, la lèvre supérieure est généralement flexible et peut être ajustée durant l'extrusion.

Les filières plates dont le canal de distribution est muni d'un dispositif de refoulement, sont faites en deux pièces. Pour éviter un fléchissement au centre de la filière, le corps de cet outillage doit être aussi rigide que possible.

Les lèvres de la filière sont interchangeables pour permettre l'obtention de différentes épaisseurs. Le canal de distribution est en forme de cintre.

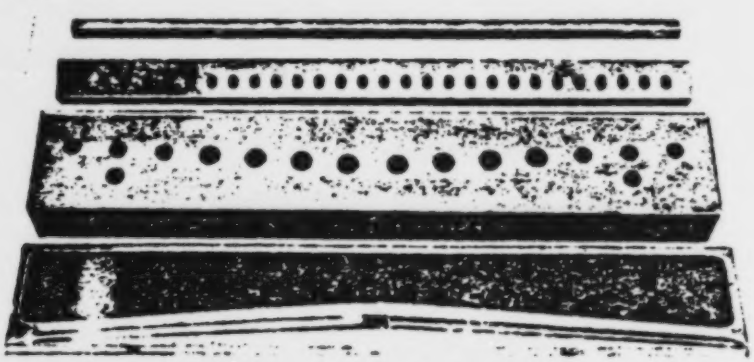
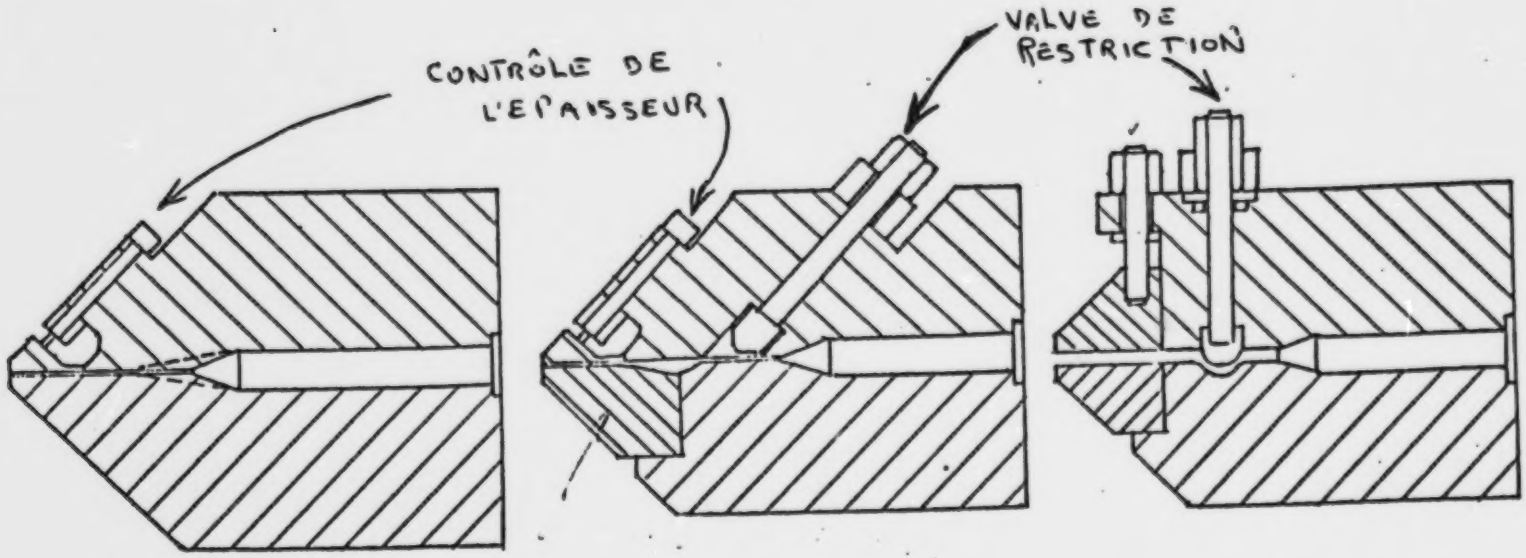


FIG.21 Composants d'une f[illegible]

FIG. 22 FILIERES POUR LA FEUILLE

SHEET EXTRUSION



FLEX LIP SHEET DIE

FEUILLE MINCE

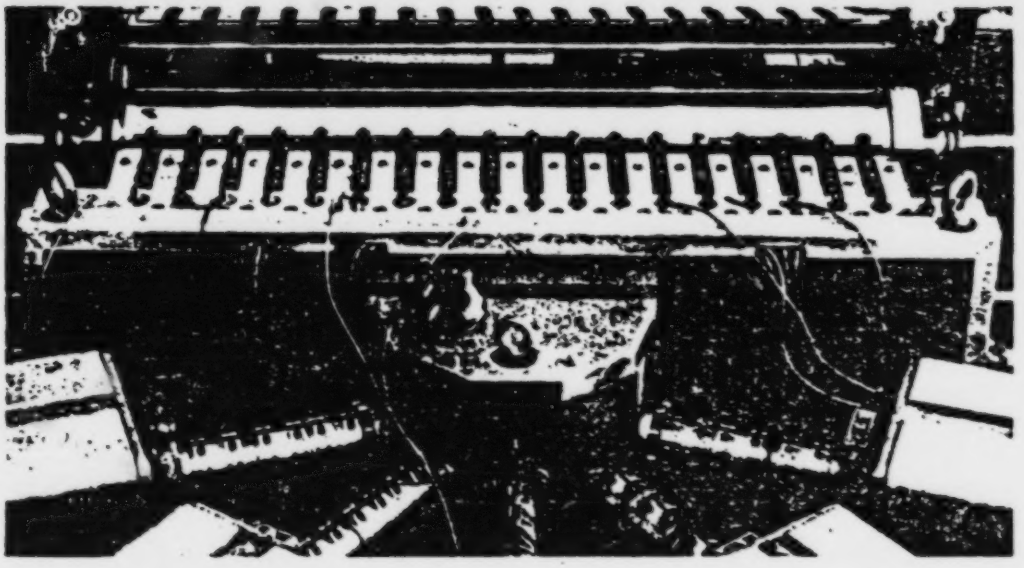
FLEX LIP + CHOKER BAR

MEILLEUR CONTRÔLE DES EPAISSEURS

HEAVY DUTY SHEET DIE

FEUILLE ÉPAISSE

CO-EXTRUSION*



La co-extrusion signifie : extrusion simultanée de plusieurs matières de même type, ou de polymères totalement différents dans une seule filière.

Du fait que les matières ne sont pas mélangées - et c'est là tout l'intérêt de ce procédé - nous assistons à l'extrusion d'un matériau complexe fait de deux ou plusieurs couches stratifiées.

Il y a donc, nécessairement, autant d'extrudeuses que de matières différentes ; mais une même extrudeuse pourra distribuer son produit en deux couches séparées.

C'est l'évolution des techniques d'emballage et des modes de conservation qui ont guidé les recherches vers des matériaux complexes, dans lesquels seraient associées les qualités spécifiques des matières de base et où seraient neutralisés les inconvénients de chacune.

La co-extrusion peut donc remplacer les procédés de laminage assurant une parfaite adhésion des résines mises en contact à l'état fondu. La co-extrusion rend possible l'utilisation de déchets rebroyés, extrudés en couche centrale entre deux couches de matière vierge.

Le facteur économique est encore amélioré par le fait que les matières-barrière (aux gaz, à l'oxygène, aux U.V., à l'humidité) dont le prix est généralement plus élevé, ne seront utilisées qu'en couche mince, le reste de la paroi étant constitué par la matière traditionnelle.

De même, la recherche d'une couleur de présentation sur la face extérieure de l'emballage ou de la pièce thermoformée augmentera ses qualités de présentation à la vente avec, en protection, une pellicule brillante et transparente, ou résistante aux rayures.

Il faut signaler aussi l'intérêt d'obtenir des plaques épaisses de faible poids, par l'extrusion en sandwich d'une matière allégée entre deux couches d'une autre ou même matière compacte. Ajoutons l'absence de micro-porosités grâce à la superposition.

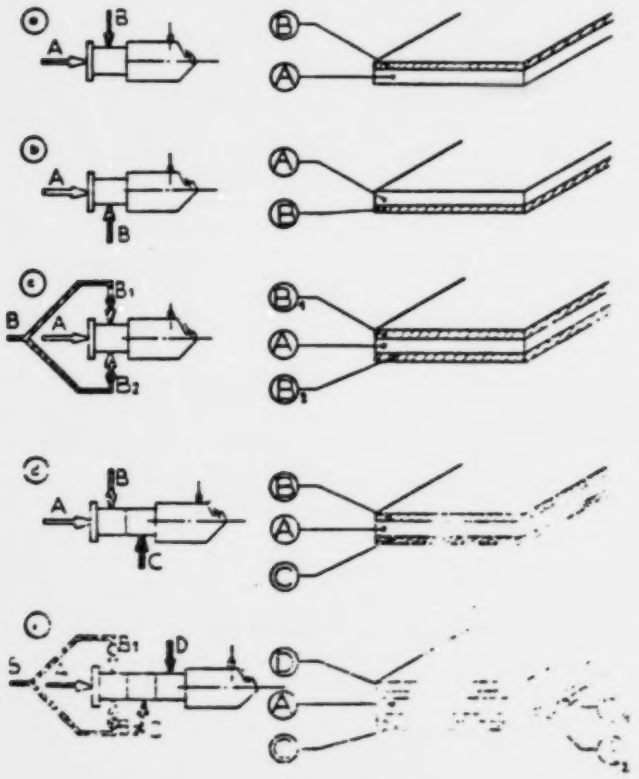
La co-extrusion peut être réalisée de deux façons différentes au niveau de la filière, par flux laminaire ou par flux séparé (filière à multicanaux).

1 FLUX LAMINAIRE

Le procédé flux laminaire fait appel au principe d'écoulement non turbulent des produits à viscosité élevée. C'est ainsi que plusieurs produits cheminent en couche séparée, avec peu de tendance à se mélanger si la pièce qui relie les extrudeuses à la filière sépare convenablement les produits dont les viscosités seront parfois différentes.

Ce résultat acquis, l'ensemble des couches sera extrudé dans une filière conventionnelle. Il apparaît donc la nécessité d'un répartiteur, différent selon les matières, et son ajustage à chaque cas.

FIG. 24

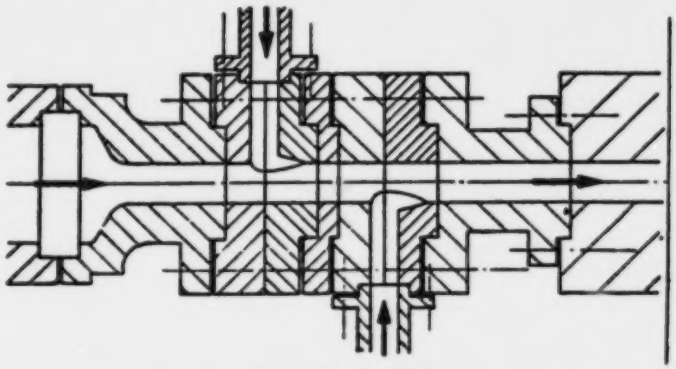


2 FLUX SEPARE

Ce procédé a l'avantage de traiter chaque matière selon ses caractéristiques propres.

Chaque produit, ainsi traité séparément des autres, sera acheminé vers les lèvres d'épaisseurs réglables, où il s'unira intimement aux autres pour former un complexe dont chacune des couches sera parfaitement connue en épaisseur et régulière sur toute la largeur de la feuille.

La filière sera donc à multi-canaux, chacun d'eux étant alimenté par une extrudeuse qui sera adaptée à la matière faisant partie du complexe final. La production de chaque extrudeuse devra, aussi, être en harmonie avec les autres, pour que la couche du complexe qu'elle assure soit reproduite sans ralentir le débit de l'ensemble. En d'autres termes, le calibre de l'extrudeuse sera choisi en fonction de l'épaisseur de cette couche par rapport aux autres couches.



(D'après L. Smith)

Les extrudeuses auront une longueur de D 28 ou de D 35 et seront munies, ou non, d'un système de dégazage. Les profils de vis seront également choisis selon les matières travaillées.

La tête se compose :

1. des collets d'amenée matière avec, éventuellement, leurs changements de filtres automatiques ;

2. du bloc de répartition assurant l'alimentation de chacune des entrées dans la filière.

Le rôle de cette pièce est primordial puisque, à partir d'une ligne déterminée, elle permet un nombre important de combinaisons dans la disposition relative des couches, donnant ainsi à l'ensemble - et sans qu'il soit nécessaire de modifier l'implantation - pratiquement tous les changements de superpositions des couches les unes par rapport aux autres.

Les *avantages* de cette technique sont les suivants :

- La régularité de chacune des couches est assurée et son épaisseur

connue. En effet, alors que dans le procédé "flux laminaire" le seul paramètre de réglage sera la vitesse de vis de l'extrudeuse correspondante, dans le "flux séparé" on dispose, en plus, du réglage de la barre-frein et de celui de la température.

- Il n'y a eu aucun mélange de matières et, cela est particulièrement intéressant et nécessaire lorsqu'il s'agit, par exemple, d'une couche de pelliculage qui devra être détachée par la suite.

- Le traitement séparé permet l'emploi de matières de viscosité et de flux d'écoulement très différents alors que, dans le flux laminaire, l'expérience montre que l'on ne pourra mettre en présence des produits dont l'écart de viscosité à température de travail ne dépassera pas le rapport de 1 à 3.

3 *PERMEABILITE DES COMPLEXES CO-EXTRUDES (d'après J. Bienfait)*

La perméabilité p. d'un complexe est donnée par la formule :

$$\frac{1}{p} = \frac{e_1}{p_1} + \frac{e_2}{p_2} + \frac{e_3}{p_3}$$

dans laquelle e_1, e_2 et e_3 sont les épaisseurs des couches de chaque matière et p_1, p_2, p_3 les perméabilités respectives.

Il ne faut pas oublier que l'emballage thermoformé aura une épaisseur bien inférieure à $e_1 + e_2 + e_3$, du fait de l'étirage de la matière lors du thermoformage.

Le taux d'étirage est le rapport de la surface de l'emballage rapportée à la surface de feuille utilisée; il peut atteindre 4 à 5, et dans ce cas la perméabilité de l'emballage sera donc 16 à 25 fois plus grande.

Il est difficile de mesurer la perméabilité des emballages terminés et les essais de conservation sont finalement toujours faits en vraie grandeur.

La comparaison des étanchéités sur feuille complexe permet d'avoir une idée d'extrapolation.

En fait, la conservation ne dépend pas seulement de la perméabilité aux gaz mais également de la protection U.V. et de la fermeture de l'emballage, de l'état d'aseptie du contenu et du contenant, de la température, de l'humidité, etc.

Perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau de divers polymères : voir tableau ci-après.

Les complexes co-extrudés les plus développés à l'heure actuelle sont les suivants :

PS/PE/PS	emballages margarines
PS/PVDC/PS	jus de fruits
PE/PVDC/PS	beurre
ABS/PVDC/PS	beurre
PVC/PS	beurre
PVDC/PS	lait

FIG. 26

FILIÈRE POUR LES FEUILLES

TRIPLE-EXTRUSION

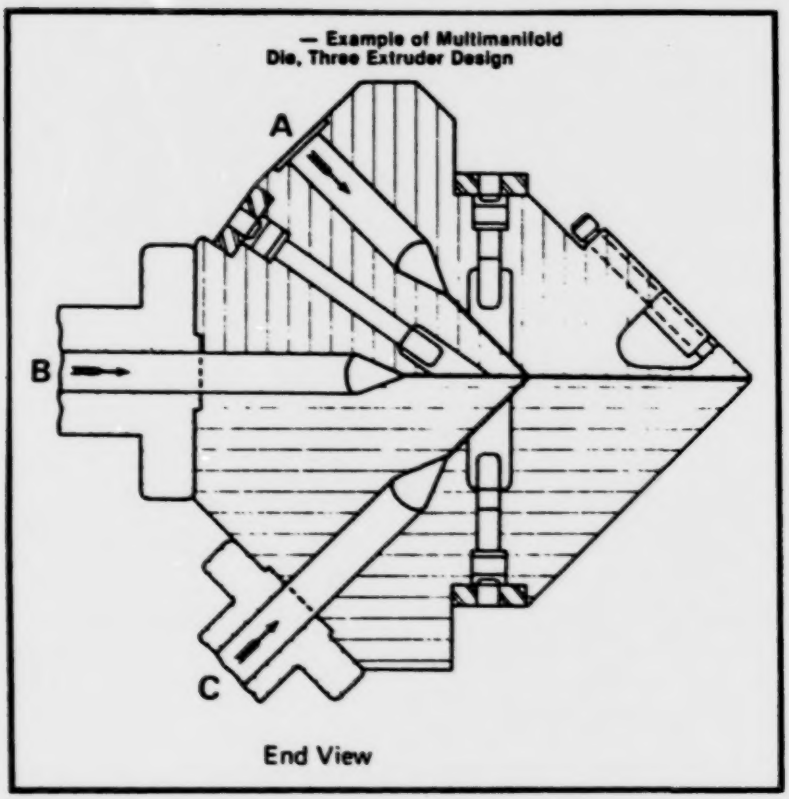


Figure 27- Example of Feedblock-Die Coextrusion System

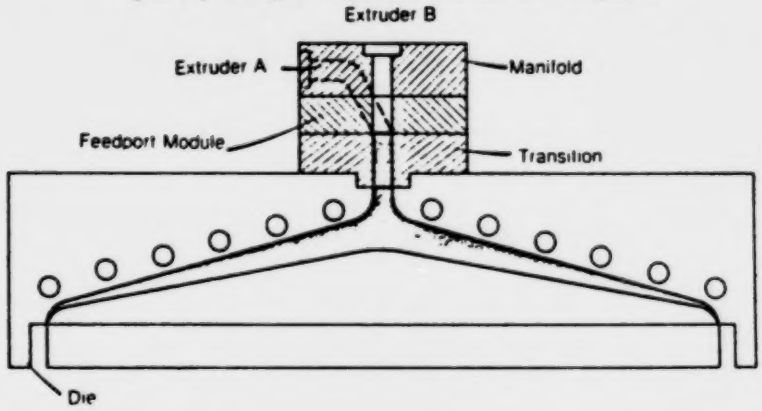
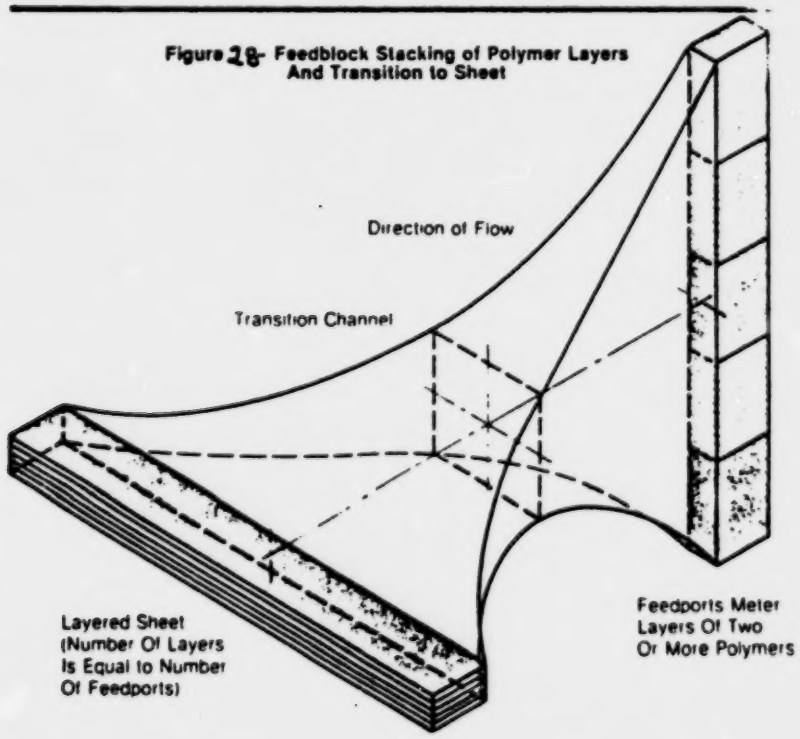


Figure 28- Feedblock Stacking of Polymer Layers And Transition to Sheet



8. OPERATION

A. L'OBTENTION DES CONDITIONS OPTIMALES

La vitesse optimale est comprise entre la vitesse maximale à laquelle il est possible de refroidir l'extrudat (tout en conservant sa forme) et celle que peut supporter la filière pour des raisons de pression et de stabilité de la matière fondue.

Voici les facteurs qui entrent en jeu:

1. les caractéristiques de l'extrudeuse - diamètre, puissance, capacité de fusion.

2. la géométrie de la vis-rapport longueur/diamètre (rapport L/D), taux de compression.

3. la conception de la filière

   - épaisseur des parois
   - longueur de la zone parallèle (lèvre)
   - ajustement

4. le type de matière

   - rigide: nylon, PVC, PS, etc.
   - souple

5. la capacité de refroidissement

   - jet d'eau, air, bassins, etc.

6. la géométrie du produit

   - rond, rectangulaire
   - parois minces, épaisses
   - parois d'épaisseur variable - profilés

Comment résoudre les problèmes d'extrusion:

1. connaître le procédé d'extrusion
2. connaître l'équipement de post-extrusion
3. déterminer si le problème est relié à l'extrudeuse ou à la résine employée
4. avoir une instrumentation adéquate

../2

5. approche logique du problème

   a) changer 1 paramètre à la fois
   b) attendre que le procédé complet redevient stable
   c) vérifier les dimensions du produit, qualité et le débit.

Il y a 4 types de problèmes liés à l'extrudeuse:

   a) déplacement solide-alimentation
   b) déplacement à l'état fondu - section pompage de la vis
   c) fusion
   d) usure de la vis et du cylindre

Déplacement solide - zone d'alimentation

Identification: baisse irrégulière de l'ampérage

1. vérifiez les courroies - moteur d'entraînement - glissements
2. vérifiez la trémie - pont de grain (résine):

   a) augmenter le volume d'eau du collier d'alimentation du cylindre
   b) réduire la température de la 1ère zone du cylindre
   c) installer un système de vibration sur la trémie
   d) réduire le % produit régénéré (broyé)

Si le problème persiste, changez le design de la vis et/ou installer un système d'alimentation forcée dans la trémie.

Déplacement à l'état fondu - zone de pompage-vis

Identification: baisse du débit (Kg/hr)

1. Pression excessive

   a) changez les tamis (écrans/contamination)
   b) température dans la filière, trop basse
   c) obstruction dans la filière

2. optimisez le profil de température du cylindre

3. vérifiez le design de la vis - usure, zone de pompage.

Fusion

Identification: grains non-fondu à la sortie de la filière

a) augmentez la température du cylindre, surtout la section de transition de la vis.
b) réduire la vitesse de la vis (t/min)
c) augmentez la température de la tête de la filière
d) changez de vis - design

I - ajouter des filets (multiples)
II - réduire profondeur des filets dans la zone de pompage
III - augmenter l'angle d'hélice du filet

Usure de la vis/Cylindre

Identification: baisse du débit (Kg/hr), pression et de l'ampérage

1. inspection de la vis et du cylindre

a) à court terme - revêtement des filets - alliages à haute résistance
b) à long terme - remplacer la vis et/ou revêtement du cylindre

PROFILES, TUYAUX

PROBLÈMES		CAUSES	
A.	Surface rude	1.	Contamination de la résine
		2.	Filière pas assez chaude
		3.	H midité dans le matériau
		4.	Surface du conformateur (calibrateur) est égratigné *
		5.	Vitesse de profilé à la sortie de la filière - trop haute
B.	Lignes continues Rainures longitudinales	1.	Intérieur de la filière - sale ou endommagnée *
C.	Lignes longitudinales beiges ou brunes		Début des brûlures - Décomposition du PVC rigide
		*	Vérifiez le manchon (sleeve) sur le calibrateur - tuyaux
D.	Distortion du profilé ou du tuyau	1.	Mauvais refroidissement
		2.	Mauvais étirage
		3.	Profilé manque de support
E.	Distortion de la largeur du profilé - (variation des épaisseurs)	1.	Températures des sections de la filière varient trop
		2.	Mauvais emplacement des gabarits (jigs)
		3.	Mauvaise conception de la filière

F.	Largeur du profilé - trop petite ou trop grande	1.	Étirage - Trop ou pas assez
		2.	Compression de l'étireuse (puller) sur le profilé
		3.	Design de la filière - Rapport de l'étirage et la largeur de la filière
G.	Profilé mat (Low gloss)	1.	Profilé froid
		2.	Filière pas assez chaude
		3.	Refroidissement - Trop vite
H.	Gonflement excessif du profilé à la sortie de la filière	1.	Température trop basse
		2.	Vitesse (RPM) - trop haute
		3.	Inventaire trop élevé de la matière dans la tête (adapteur) de la filière
		4.	Zone parallèle de la filière - trop courte
I.	Faible résistance au choc (impact) Tuyaux fendus	1.	Température basse - extrudeuse
		2.	Refroidissement accélé des profilés
		3.	PVC en poudre - mauvais mélange
		4.	Filière (land) pas assez longue
J.	Profilé se brise facilement en le pliant	1.	Refroidissement accélé des profilés
		2.	Température basse - extrudeuse
		3.	Sections rectangulaires de la filière n'ont pas de rayons (sharp corner)
K.	Peau d'orange - ondulation sur la surface du profilé	PVC en poudre - profilés, panneaux (siding)	
		1.	Mélange excessif du compound
		2.	Mauvais réglage du refroidissement de la vis
		3.	Système d'évent sous vide est bloqué

L.	Diffusion de matière vers la surface du profilé - à la sortie de la filière (plate out)	PVC en poudre 1. Vis à 2 stages - augmenter la température de la zone de décompression 2. Reformuler le compound - surtout stabilisant d'étain et lubrifiant (Ca St)
M.	L'extrusion par coups (surging)	1. Usure des courroies de l'étireuse 2. Vibration de la scie durant le coupage - synchronisation 3. Mauvais fonctionnement des thermocouples - bandes chauffantes 4. Variations de l'ampérage - a) courroies du moteur b) alimentation de la matière 5. Pression trop basse 6. Usure de la vis - mauvaise conception de la vis 7. Zone parallèle de la filière - trop courte 8. Poudre PVC - ajuster l'alimentation forcée 9. Alimentation irrégulière
N.	Baisse de rendement de l'extrudeuse - débit (lbs/hr)	1. Pression trop élevée 2. Usure de la vis 3. Filière trop petite 4. Vis pour un autre thermoplastique 5. Système de refroidissement est trop lent
O.	Petite surface surélevée sur le tuyau	1. Gouttes d'eau sur le tuyau exposé à l'air

FEUILLES

PROBLÈMES		CAUSES	
A.	Lignes continues Rainures longitudinales	1.	Intérieur de la filière sale ou endommagé
		2.	Rouleaux de refroidissement - sales ou endommagés
		3.	Humidité dans le compound
		4.	Décomposition - particules dans la filière
B.	Lignes continues Rainures transversales	1.	Température du matériau trop chaude ou pas assez
		2.	Feuille colle sur les rouleaux de refroidissement
		3.	Étirage non-uniforme de la feuille
		4.	Tension trop haute entre les rouleaux de refroidissement et ceux du train d'étirage
C.	Feuille ondulée	1.	Mauvaise température des rouleaux de refroidissement
		2.	Refroidissement insuffisant
D.	Surface mat au lieu de brillante	1.	Épaisseur de la feuille varie trop
		2.	Rouleaux trop froids
		3.	Mauvais centrage des rouleaux - usure
		4.	Ouverture (gap) excessive entre les 2 premiers rouleaux

E.	Petites sections très brillantes (shiny spots)	1.	1er rouleau trop chaud
		2.	Section brillante trop épaisse
		3.	Température non-uniforme du rouleau - dépots calcaires, intérieur des rouleaux
F.	Points noirs ou discoloration	1.	Contamination dans le compound
		2.	Mauvais mélange du compound
		3.	Nettoyage insuffisant de l'extrudeuse
		4.	Décomposition du compound - T trop haute
		5.	Trop de matériau broyé (regrind)
		6.	Filière sale
G.	Bulles d'air dans la feuille	1.	Humidité dans le compound
		2.	L'air dans le cylindre de l'extrudeuse
H.	Alvéoles - petite dépression	1.	Humidité
		2.	Rouleaux trop froids
		3.	Égratignures sur les rouleaux
		4.	Partie des rouleaux écaillés
I.	Épaisseur de la feuille non-uniforme - variations	1.	Ajustement de la valve sur la filière
		2.	Augmentation de la température de la filière - section trop mince
		3.	Diminution de la température de la filière - section trop épaisse
		4.	Vérification des bandes chauffantes, cadrans, contrôles

CAPACITE DE PRODUCTION HORAIRE

FACTEURS:

1. LA LIMITATION ULTIME DE LA PRODUCTION HORAIRE (KG/HR) DANS L'EXTRUSION EST LA POSSIBILITÉ DE CALIBRAGE ET DE REFROIDISSEMENT DU PRODUIT.

2. LA CAPACITÉ DE PRODUCTION D'UNE EXTRUDEUSE EST DÉTERMINÉE PAR LA PUISSANCE DU MOTEUR D'ENTRAÎNEMENT.

3. LE DESIGN DE LA VIS POUR UNE EXTRUDEUSE DE MÊME DIAMÈTRE ET DE PUISSANCE MOTRICE.

4. LA CONCEPTION DE LA FILIÈRE.

5. PRESSION DU MATÉRIAU AVANT D'ENTRER DANS LA FILIÈRE.

6. JEU D'ENGRENAGES INTERCHANGEABLES PERMETTANT UNE MEILLEURE UTILISATION DE LA PUISSANCE DE L'ENTRAÎNEMENT.

7. UNE INSTRUMENTATION DE PRÉCISION.

9. CONTROLE DE LA QUALITE (C.Q.)

LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ COMMENCE LORS DE LA RÉCEPTION DE LA MATIÈRE PREMIÈRE ET SE TERMINE PAR L'EXPÉDITION DES PRODUITS PROFILÉS AU CLIENT.

UN PRODUIT A UNE BONNE QUALITÉ LORSQU'IL RENCONTRE LES NORMES DU CLIENT.

COMPAGNIES
ASSOCIATIONS, NORMES
CONSOMMATEURS

9. CONTROLE DE LA QUALITE

TUYAUX - PE, PVC, ABS

La tâche du contrôle de la qualité est de s'assurer que la qualité du produit fini rencontre les exigences pour lesquelles il est fabriqué.

Le contrôle de la qualité commence à exercer ses fonctions à la réception de la matière première.

Comme nous avons plusieurs sortes de matière première qui servent dans la fabrication de nos tuyaux nous allons les énumérer un par un et vous donner le genre de test que nous effectuons sur chacune ainsi que les normes que le matériel devra rencontrer.

9.1 LES GRAINS DE ABS

Nous avons quatre(4) sortes principales de grains de ABS qui sont le LN1-781, le 4113, le monsanto 8544 et le 4051. Tous les quatre (4) doivent être soumis à un test de "Melt Index". Ce test sert à déterminer la fluidité du matériel, mais pour mieux comprendre ce qu'est le test de melt index, je vais vous l'expliquer un peu plus en détail. Référez-vous svp à la figure 1 - schéma de la machine à melt index. Pour effectuer ce test il faut chauffer le cylindre à une température donnée soit 374 deg. F (190°C) pour le polyéthylène et 446 deg. F (230°C) pour le ABS.

Lorsque le cylindre est à la température voulue, nous insérons le matériel dans le cylindre en prenant la précaution de bien le compacter, puis nous insérons le piston à l'intérieur du cylindre en appliquant un poids sur celui-ci; nous laissons alors le matériel se réchauffer à l'intérieur du cylindre pendant cinq (5) minutes puis nous enlevons le poids sur la tige pour le remplacer par un autre poids qui celui-ci doit être d'un poids bien défini soit, 5,000 gr. pour du ABS et 2,160 gr. pour du polyéthylène. Sous le poids du piston le plastique qui est à une haute température passera par l'orifice tel que montré à la figure 1, et c'est la quantité de plastique qui passera par l'orifice pour une durée d'une (1) minute qui donnera la valeur de fluidité. Cette valeur s'exprime en gr/minute ou en gr/10 minutes.

9.2 LES RESINES DE POLYETHYLENE (PEBD)

Ces résines se divisent en deux (2) catégories:

a) la résine approuvé ACNOR (CSA) soit le matériel 6011 d'Union Carbide Canada
b) la résine conventionnelle DFDY 6012

Pour ces deux (2) sortes de grain nous devons faire des tests de melt index et les résultats devront se situer entre .5 gr à 1.5 gr./10 minutes pour le 6012 et .2 gr. à .5 gr./10 minutes pour le 6011.

9.3. LA RESINE P.V.C.

Sur cette résine, nous effectuons des tests d'humidité ainsi que des tests de "Dry Flow", lorsque cette résine est en poudre.

9.4. LA RESINE DE C.P.V.C.

Sur cette nouvelle résine nous effectuons des tests d'humidité seulement.

9.5. FREQUENCE DES ESSAIS

Je suis certain maintenant que vous connaissez le genre de tests qui sont faits sur la résine vierge. Maintenant parlons de la fréquence de ces vérifications.

(a) pour ce qui est des tests de melt index sur du PE ainsi que du A.B.S. nous prenons un échantillon à tous les 10,000 lbs de matériel jusqu'à un (1) échantillon à tous les 500 lbs selon le cas.

Ce qui détermine le nombre d'échantillons que nous devons prendre est la connaissance de la qualité du produit, c'est-à-dire que lorsque c'est un produit que nous recevons fréquemment et que nous n'avons jamais eu de complications, nous effectuons un test à tous les 10,000 lbs de résine et si les résultats obtenus sont constants nous pouvons donc supposer que le reste de cette réception sera acceptable; advenant qu'il y ait une grande marge entre ceux-ci, nous prendrons des échantillons additionnels afin de déterminer quelle quantité de matériel est différente et advenant le cas la quantité qui est impropre à l'utilisation.

Cependant, lorsque nous recevons du matériel sur lequel nous n'avons aucun record, nous prendrons un (1) échantillon tous les 500 lbs afin de déterminer si le produit est constant et la quantité réelle de résine qui ne pourra être utilisée advenant le cas.

(b) pour ce qui est de la résine P.V.C. nous vérifions pour le "Dry Flow", deux (2) échantillons de poudre mélangée sur chaque quart de production.

Considérons maintenant, la tâche du contrôle de la qualité lors de la fabrication du produit. Quel doit être le rôle du département du contrôle de la qualité?

9.6 Le contrôle de la qualité doit vérifier tous les points qui sont possible d'être vérifier immédiatement après l'extrusion pour informer le plus tôt possible la production à savoir, si le tuyau qui est en fabrication est acceptable ou non et s'il y a des points qui demanderaient une amélioration. De ces points, nous pourrons énumérer les plus importants:

1. les dimensions: à savoir si le tuyau rencontre bien les spécifications sur le diamètre extérieur ou intérieur selon le cas.
2. les épaisseurs de murs: à savoir si le tuyau est fabriqué avec des murs dans les limites requises.
3. le fini intérieur, c'est-à-dire si visuellement le fini intérieur du tuyau comporte des ondulations ou des rainures.
4. le fini extérieur, c'est-à-dire si le fini extérieur est uni et uniforme sans bulles d'air et sans rainures.
5. l'imprimerie à savoir si toutes les identifications requises sont sur le tuyau et si elle adhère correctement à celui-ci (ex.: PE).
6. la longueur des tuyaux, c'est-à-dire que nous vérifions, si les tuyaux ont la longueur minimum requise.
7. nous vérifions visuellement le bobinage des tuyaux de PE, c'est-à-dire si celui-ci n'a pas cassé lors de son enroulement dû à un bobinage trop petit.

9.7 La tâche du contrôle de la qualité ne s'arrête cependant pas là, nous devons mesurer la production de toute la journée de chaque machine. Comme il nous est impossible pour le moment d'échantillonner nous-même le produit, nous devons donc demander à chaque opérateur de machine sur chaque équipe de prendre l'échantillon à toutes les ½ heure et de les placer dans des sacs à cet effet.

Tous les matins, les techniciens du contrôle de la qualité ramassent ces échantillons. Ce qui totalise 16 échantillons par quart par machine. De ces 16 échantillons que nous recevons par quart, voici comment nous les vérifions:

1. pour le tuyau ABS-DWV, le PVC égoût, et le PVC conduit, nous sélectionnons au hasard 4 des 16 échantillons pour fin dimensionnelle, tandis que les 12 autres serviront seulement pour des fins d'impact. Sur les 4 échantillons sélectionnés nous mesurons:

   (a) le diamètre extérieur moyen avec un "tape" périphérique.
   (b) 8 épaisseurs de murs prises à des points équidistants l'un de l'autre et ce, sans prendre de référence comme point de départ.

(c) l'ovalité avec un vernier, c'est-à-dire le diamètre intérieur maximum moins le diamètre extérieur minimum.
(d) un test d'impact sur tous les échantillons.

Mais qu'est-ce qu'un test d'impact? (choc)

Le test d'impact c'est un test qui sert à déterminer la résistance du produit au choc. Le test d'impact se fait en laissant tomber un poids en chute libre sur le tuyau et la force d'impact s'exprime en LB-PI. Voir figure 2.

(EXPLICATION DE LA MACHINE)

Lorsque nous faisons le test d'impact sur un tuyau de A.B.S. ou de P.V.C. nous essayons toujours de déterminer la force d'impact maximum que le tuyau peut supporter sans se briser. Le test se fait comme ceci, nous augmentons la force d'impact graduellement jusqu'à ce que nous ayons un échantillon qui brise, alors nous diminuons graduellement la force d'impact jusqu'à ce que nous ayons un échantillon qui ne brise pas, alors nous recommençons à augmenter la force d'impact. Le point maximum d'impact ou nous n'avons eu aucun bris est la force maximum d'impact que le tuyau peut supporter. Nous avons adopté ce système afin d'avoir une vue plus réelle de la qualité de notre produit.

Tous ces résultats sont compilés sur une forme à cet effet.

2. pour les tuyaux de PE nous sélectionnons également au hasard par quart 4 des 16 échantillons pour fin dimensionnelle tandis que les 12 autres seront mesurés avec le gabarit seulement. sur ces 4 échantillons nous prendrons:

(a) 8 épaisseurs de murs prises à des points équidistants l'un de l'autre et ce, sans prendre de référence comme point de départ.
(b) le diamètre extérieur moyen avec le "tape" périphérique.

Ayant déterminé le diamètre extérieur moyen ainsi que l'épaisseur de mur moyen, il nous est maintenant facile de déterminer le diamètre intérieur moyen, c'est-à-dire, le diamètre qui est le plus important pour le tuyau de polyéthylène et ce, en soustrayant deux fois les épaisseurs des murs moyens du diamètre extérieur moyen.

(c) nous vérifions le diamètre intérieur à l'aide d'un gabarit sur tous les échantillons; vous trouverez une illustration ainsi que les dimensions pour les gabarits à la figure 3.
(d) nous compilerons tous ces résultats sur des formes qui ont été faites spécialement à cet effet.

Ex: un tuyau qui aurait un diamètre intérieur au minimum mais que sur le test du gabarit, il indiquerait qu'il serait grand; cela nous indiquerait immédiatement que le tuyau avait un manque sur le fini interne, soit un plat, soit une rainure.

9.8 Vous avez sans doute remarqué qu'avec les 2 formes de compilation, il est possible de déterminer exactement quelle était la qualité du tuyau. Cependant cette compilation nous aidera à analyser les plaintes des clients dans la mesure ou nous recevrons les échantillons avec le code inscrit sur celui-ci. Car la seule façon de retracer la date de production, est par le code qui apparaît sur le tuyau. Bien entendu nous nous ne basons pas seulement sur les résultats obtenus sur les échantillons; nous analysons toujours en profondeur l'échantillon que nous recevons du client. Nous effectuons des tests de melt index, nous vérifions les dimensions et nous effectuons des tests de pression lorsque l'échantillon reçu est assez grand. Comme vous le constatez, Messieurs, il est très important que sur l'échantillon de la plainte nous puissions avoir le code du tuyau pour pouvoir retracer la date de fabrication du tuyau et il est important également que la longueur de cet échantillon soit suffisante pour que nous puissions effectuer tous les tests. Règle générale, un échantillon de 2 pieds de long est suffisant.

APPAREIL SERVANT A DETERMINER LA FLUIDITE DU MATERIEL

FIGURE 1

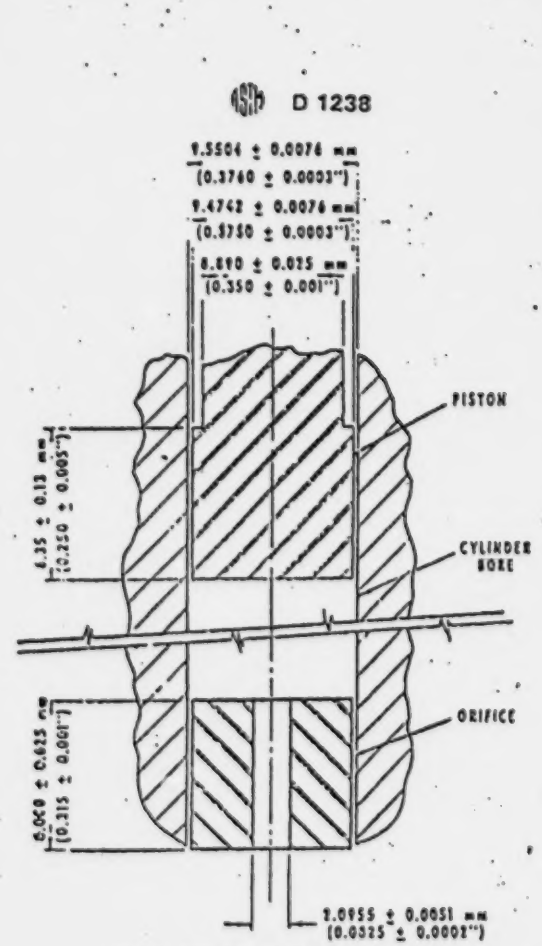


FIG. 2 Details of Extrusion Plastometer.

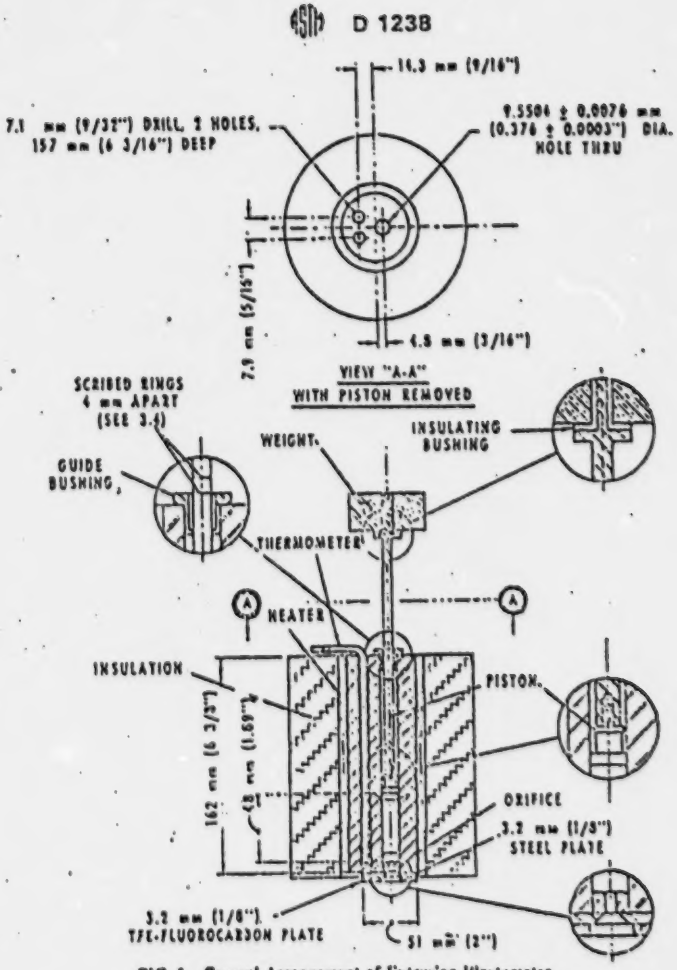


FIG. 1 General Arrangement of Extrusion Plastometer.

IMPACT TESTER

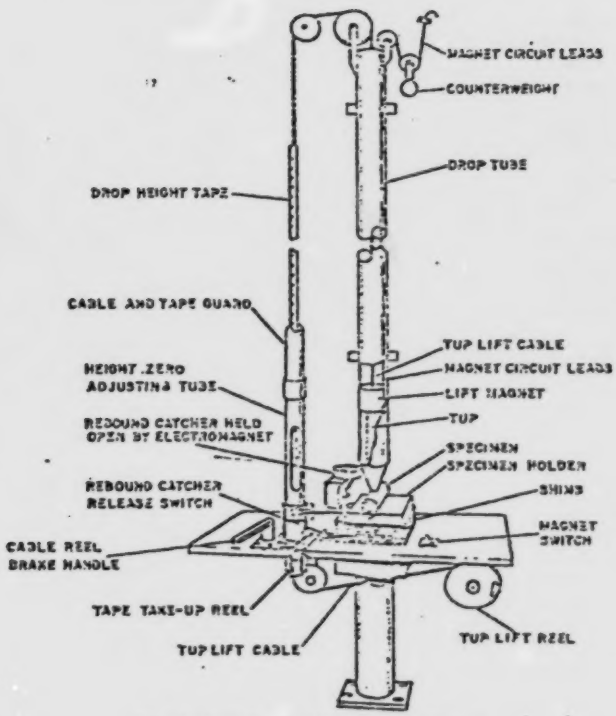


FIG. 3—One Type of Tup Impact Tester.

Choc . à chute libre

DIMENSIONS POUR EXTRUSION

P O L Y E T H Y L E N E C S A

SERIE 50

GROSSEUR	I.D.	MUR MIN.	MUR MAX	IDEAL	PRESSION Lbs/po^2
1-1/4"	1.380	0.092	0.101	0.096	50
1-1/2"	1.610	0.107	0.118	0.112	50
2"	2.067	0.138	0.150	0.144	50

SERIE 75

1/2"	0.622	0.070	0.077	0.073	75
3/4"	0.824	0.0835	0.092	0.088	75
1"	1.049	0.108	0.116	0.112	75
1-1/4"	1.380	0.143	0.152	0.147	75
1-1/2"	1.610	0.166	0.176	0.171	75
2"	2.067	0.214	0.226	0.220	75

DIMENSIONS POUR EXTRUSION

P O L Y E T H Y L E N E C S A

SERIE 100

GROSSEUR	I.D.	MUR			PRESSION Lbs/po^2
		MIN.	MAX.	IDEAL	
1/2"	0.622	0.089 @	0.095	0.091	100
3/4"	0.824	0.118 @	0.125	0.121	100
1"	1.049	0.150 @	0.158	0.154	100
1-1/4"	1.380	0.197 @	0.206	0.201	100
1-1/2"	1.610	0.230 @	0.241	0.235	100
2"	2.067	0.295 @	0.307	0.301	100

DIMENSIONS DES TUYAUX A B S

APPROUVE PAR C S A

GROSSEUR TUYAUX PO.	D W V			DRAIN & EGOUT					
				UNI			PERFORE		
	O.D. MIN-MAX	RONDEUR MIN-MAX	MUR MIN-MAX	O.D. MIN-MAX	RONDEUR MIN-MAX	MUR MIN-MAX	O.D. MIN-MAX	RONDEUR MIN-MAX	MUR MIN-MAX
1 1/4	1.660 1.670	1.653 1.677	.140 .155						
1 1/2	1.900 1.910	1.893 1.917	.145 .160						
2	2.375 2.385	2.369 2.392	.154 .170	2.250 2.260	2.235 2.285	.080 .090			
3	3.500 3.515	3.493 3.522	.216 .231	3.250 3.260	3.235 3.275	.100 .110	3.245 3.265	3.235 3.275	.080 .085
4	4.500 4.515	4.493 4.522	.237 .261	4.212 4.227	4.190 4.250	.120 .130	4.208 4.233	4.185 4.255	.088 .094
6				6.268 6.295	6.242 6.321	.170 .180			

9. CONTRÔLE DE LA QUALITÉ - PROFILÉS

Les essais de contrôle de la qualité surtout pour les profilés en PVC sont:

1. Inspection visuelle
2. Dimensions et tolérances
3. Résistance au pliage
4. Résistance du PVC à l'acétone
5. Degré de rétrécissement (shrinkage)
6. Résistance au choc en chute libre (drop impact)

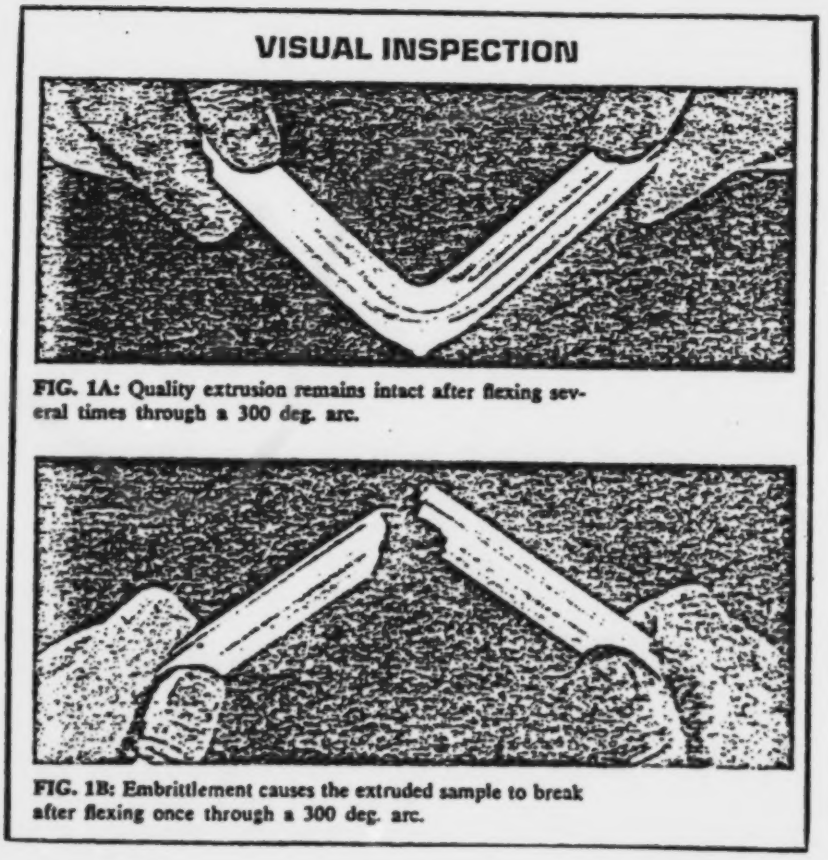


FIG. 1A: Quality extrusion remains intact after flexing several times through a 300 deg. arc.

FIG. 1B: Embrittlement causes the extruded sample to break after flexing once through a 300 deg. arc.

ACETONE IMMERSION

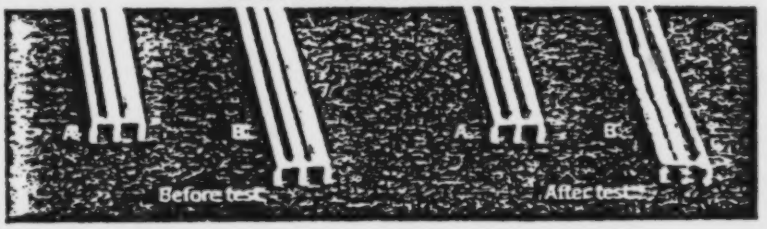


FIG. 2: Before: Part A is quality part, Part B is reject—both from same machine and die. After immersion: Part A maintains quality appearance, while Part B is brittle and was attacked.

HEAT SHRINKAGE

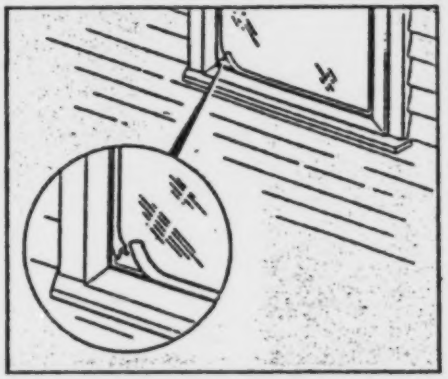


FIG. 3: When installed, glazing bead joints matched. In use, the surface of the bead strip reached 130 to 140° F. At these temperatures, the stress caused by the rapid drawdown was relieved and shrinkage occurred. Note how the bead strip pulled away at the corners causing a loss of structural stability and weather-tightness.

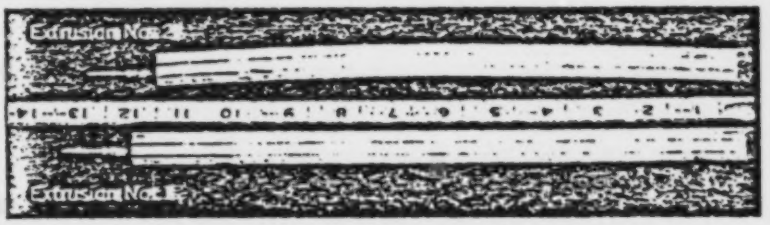
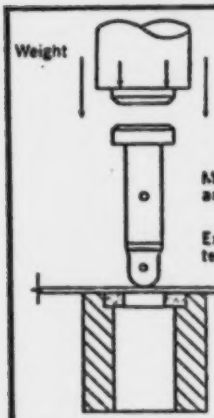


FIG. 4: Both extrusions were marked before and after exposure to 180° F. for 30 min. Extrusion No. 1 has shrinkage of less than 0.1%; No. 2 has noticeable warpage and shrinkage of 3.5%.

DROP-DART IMPACT



← FIG. 5: Test arrangement for drop-dart impact test.

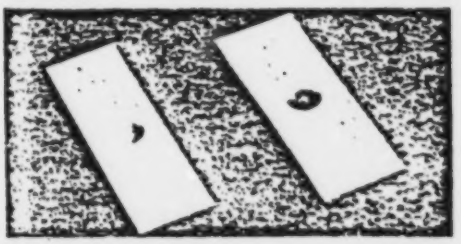
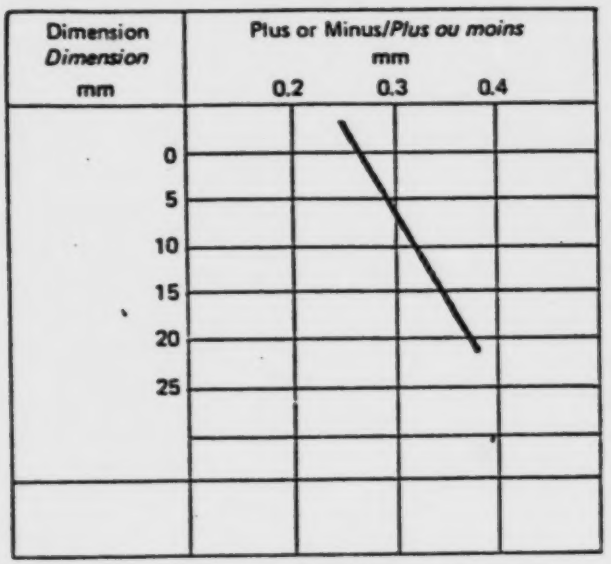


FIG. 6: In drop-dart impact test, part at right failed due to improper extrusion.

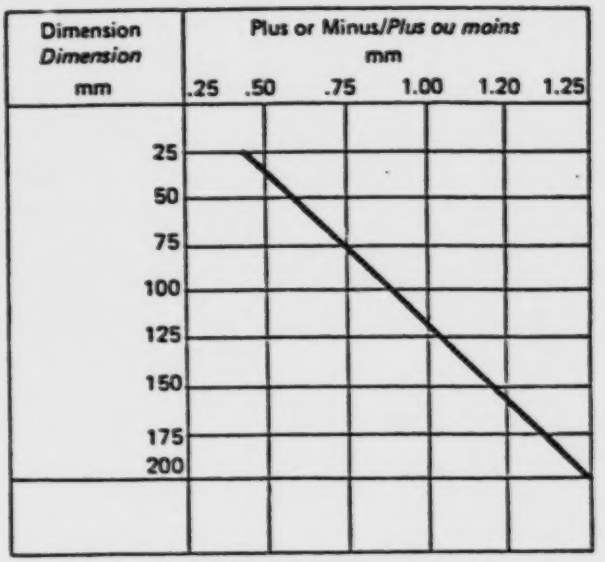
DIMENSIONAL TOLERANCE/TOLÉRANCE DIMENSIONNELLE

NOTE: The Commercial values shown below represent common production tolerances.

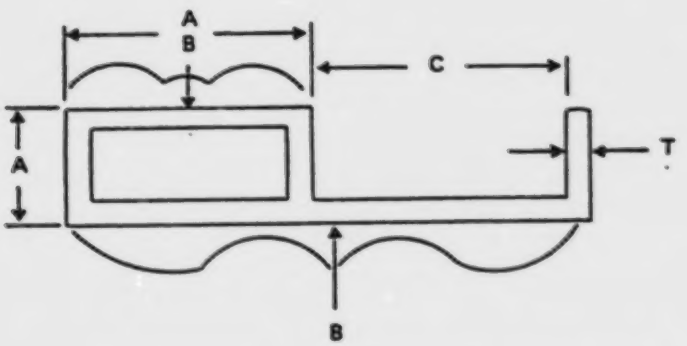
REMARQUE: Les valeurs commerciales sous-mentionnées correspondent aux tolérances courantes de fabrication.



FROM 0 TO 25 mm
DE 0 À 25 mm



FROM 25 TO 200 mm
DE 25 À 200 mm



REFERENCE NOTES

Dimensions – Part dimensions such as indicated by the letter "A" and wall thickness by the letter "T", in the sketch above shall be determined from the appropriate graph.

Air Gaps, such as indicated by the letter "C", shall be the tolerance shown for the equivalent solid dimensions plus 25%.

REMARQUES DE RÉFÉRENCE

Dimensions – Les dimensions des parties correspondant à la lettre "A", et l'épaisseur du profilé correspondant à la lettre "T" indiquées sur le schéma ci-dessus doivent être déterminées à partir du graphique approprié. La tolérance dimensionnelle des parties évidées correspondant à la lettre "C" doit être la même que celle des parties pleines plus 25%.

The tolerance below 1.90 mm shall be plus (+) or minus (−) 0.15 mm and between 1.90 mm and 3.2 mm be plus (+) or minus (−) 8%.

Flatness — Flatness of surfaces such as those indicated by the letter "B" shall be plus (+) or minus (−) .130 mm per 25 mm of width.

Straightness — The deviation from a straight line shall not exceed 1.5 mm per 30 cm of length, when the profile is placed on a flat surface in such a way that the mass minimizes the deviation.

Twist — Twist tolerance shall be plus (+) or minus (−) one half degree per 30 mm with a maximum of five (5) degrees.

Angle — Angle tolerance shall be plus (+) or minus (−) two (2) degrees.

Length — Length tolerance of rough cut or sawn extrusions shall always be plus (+).

La tolérance correspondant aux dimensions inférieures à 1.90 mm doit être de plus (+) ou moins (−) 0.15 mm, et celle qui correspond aux dimensions situées entre 1.90 mm et 3.2 mm doit être de plus (+) ou moins (−) 8%.

Surfaces planes — Les surfaces indiquées par la lettre "B" par ex. doivent être planes sous réserve d'une tolérance de plus (+) ou moins (−) .130 mm par 25 mm de largeur.

Rectitude — La déviation par rapport à une ligne droite ne doit pas être supérieure à 1.5 mm par 30 cm de longueur, lorsque le profilé est placé sur une surface plane de façon que la masse réduise la déviation au minimum.

Torsion — La tolérance de torsion doit être de plus (+) ou moins (−) un demi-degré par 30 cm en fonction d'un maximum de cinq (5) degrés.

Angle — La tolérance angulaire doit être de plus (+) ou moins (−) deux (2) degrés.

Longueur — La tolérance de longueur des profilés coupés grossièrement ou sciés doit toujours être positive (+).

LISTE DE VERIFICATION POUR OPERATIONS SECURITAIRES DE L'EXTRUSION

MEME AVANT L'ARRIVEE DE O S H A, LA SOCIETE DE L'INDUSTRIE PLASTIQUE ETAIT ACTIVEMENT ENGAGEE A AMELIORER LA NORME DE SECURITE POUR LES EMPLOYES DES USINES

La préoccupation pour la sécurité d'un employé a été depuis longtemps une importante considération pour chaque industrie majeure des Etats-Unis; et l'Industrie de Plastique n'est pas une exception. Même avant l'arrivée de O S H A, diverses sociétés ou associations et comités au sein de l'industrie travaillaient vers l'amélioration des normes de sécurité pour sauvegarder les employés dans les usines de production et de conversion de plastique.

La Société de l'Industrie Plastique a reconnu depuis longtemps le besoin d'un consensus sur une norme pour définir et établir les conditions requises de sécurité dans la construction, le soin et l'utilisation de l'équipement qui est utilisé dans l'industrie plastique. Depuis les années 60, les membres de moulage par injection, section mécanique de la division de mécanique du SPI avaient entrepris la tâche de développer une norme de sécurité pour l'industrie de moulage par injection. Après un effort ardu et de longue durée, leur travail a évolué sous l' "Institut National de Standard Américain", ANSI B 151.1 - Conditions requises pour la construction, le soin et l'usage de machines à injection horizontale. Le travail ne s'est pas arrêté ici. ANSI B 151.1 a été soumis à O S H A pour approbation, pour être accepté comme consensus normalisé pour faire partie des exigences officielles de O S H A.

Présentement, la division de la machinerie de la Société de l'Industrie de Plastique au travers de ses sections, continue le développement de 24 normes additionnelles se rapportant aux normes de sécurité pour tous les autres équipements de conversion du plastique. L'ultime objectif est de procurer aux convertisseurs de

plastique une liste des normes promulguées par ANSI et adopté par O S H A, pour servir de guide afin d'établir un lieu de travail sûr au point de vue environnement. Ce qui suit est un sommaire d'un consensus d'une norme qui couvrirait l'industrie de l'extrusion pour soumission au ANSI.

Il doit être reconnu que les meilleures normes de sécurité qui peuvent être mises en oeuvre n'assurent pas complètement une immunité contre les blessures. Outrepasser les barrières, l'enlèvement des gardes, le manque de connaissance de l'équipement, l'insouciance individuelle, tout ceci peut conduire à des accidents impliquant des blessures personnelles. Des accidents ne se produisent par d'eux-mêmes; ils sont reliés aux humains et sont généralement causés par les actions de certains individus.

METHODES DE FONCTIONNEMENT DES NORMES DE SECURITE

Un des moyens le plus efficace pour assurer la sécurité d'un individu et de ses confrères de travail dans l'usine, réside dans l'entraînement de l'individu lui-même. Un opérateur bien entraîné dans les opérations de conversion, ayant une connaissance de la machine qu'il opère, au courant du but et de l'emplacement du mécanisme de sécurité qui est sur les machines et est renseigné sur les bonnes méthodes de sécurité, est doté du système de sécurité le plus efficace qu'il puisse y avoir.

OPERATIONS SECURITAIRES DES EXTRUDEUSES

La fonction d'une extrudeuse dépend de trois (3) conditions de base: température, pression et torque. L'habilité de sélectionner et maintenir des conditions propres aux opérations est fournie par les contrôles et les indicateurs qui équipent chaque extrudeuse. Les contrôles de température, les systèmes d'indication à pression,

les indicateurs de vitesse et ampèremètres ne doivent pas seulement être utilisés pour contrôler les conditions du procédé mais aussi être utilisés en tant que source efficace d'information, essentielle pour maintenir une opération sécuritaire. Par conséquent, il est d'une extrême importance que tous les contrôles et instruments indicatifs soient en bonne condition d'opération en tout temps.

Les procédures de préchauffage et de démarrage doivent inclure obligatoirement que tous les contrôles, instruments indicatifs et moyens de sécurité devraient être vérifiés minutieusement pour être certain qu'ils sont en bonne condition de fonctionner convenablement.

Aussi l'opérateur doit vérifier si tous les gardes sont en place. La liste de vérification qui suit aidera l'opérateur à reconnaître certains malfonctionnements qui peuvent se développer en conditions hasardeuses d'opérations.

Pendant le préchauffage de l'extrudeuse toutes les zones de chaleur ouverte et les zones sur le baril ajusté pour le chauffage automatique et le refroidissement, vérifier que chaque ampèremètre indique le pouvoir normal de la consommation d'énergie. Un ampèremètre qui ne montre aucun débit peut indiquer un élément brûlé ou un contact défectueux. Fermer toutes les zones et placer l'entrée principale de puissance dans la position fermée et appeler l'électricien. Vérifier la condition de l'élément. Remplacer l'élément s'il est brûlé.

Si l'ampèremètre indique que le courant est normal et si le contrôle de température indique une température basse, ceci signifie qu'un thermocouple est défectueux ou court-circuité. Si cette condition est observée sur un contrôle pour une zone du baril, la cause probable peut être un thermocouple défectueux ou une soupape ne fonctionnant pas bien dans le système de refroidissement qui demeure ouverte et refroidit constamment la zone.

Si une température élevée est continuellement indiquée sur le contrôle d'une zone du baril, avec l'ampèremètre indiquant normal, le problème peut être une soupape défectueuse dans le système de refroidissement qui demeure fermé ne causant aucun refroidissement; le volume d'agent de refroidissement peut être trop bas dans le réservoir résultant en un refroidissement insuffisant.

Si le matériel qui est traité est d'un genre qui permet qu'une extrudeuse se refroidisse pendant la nuit sans être purgée avec un tuyau de transfert entre la filière et l'extrudeuse, une extrême prudence doit être déployée pendant le chauffage du tuyau de transfert au cours de la reprise des opérations.

Dans certains cas, la petite proportion du tuyau de transfert comparée avec la masse du baril et de la filière, demande une proportion plus grande de puissance thermale et le tuyau de transfert peut se réchauffer plus rapidement et atteindre la température bien avant que l'extrudeuse et la filière atteignent la température du matériel plastique, résultant en un bouchon de matériaux solides à chaque extrémité du tuyau de transfert. Si la fusion dans le tuyau de transfert est gardée à haute température pour une période relativement longue jusqu'à ce que la filière et le baril atteignent la chaleur désirée, le matériel peut se dégrader et un gaz peut être engendré produisant une pression excessivement élevée. Une relâche soudaine de cette pression, lorsque la filière atteint une température suffisante pour fondre le bouchon du matériel, peut projeter gaz et matériel fondu hors de la filière, causant des brûlures sévères au personnel dans cet endroit.

Par conséquent, une sérieuse considération doit être donnée afin d'éviter l'élévation rapide des températures d'un tel système de transtert, ou retarder le commencement du chauffage jusqu'à ce que la filière et le baril atteignent une température suffisante, pour au moins une (1) heure, ou jusqu'à ce que ce soit certain que tout le matériel est au-dessus de la température fondante.

Durant le démarrage de l'extrudeuse avec vis tournant lentement et le matériel étant alimenté, observé constamment, la pression de la tête de l'extrudeuse et la puissance pour tourner le moteur et l'alimentation. Si un des contrôles ne fonctionne pas ou si la pression de la tête est excessive: fermer l'extrudeuse et faire les réparations nécessaires.

Pendant que l'on observe la pression de la tête, être alerte aux conditions suivantes: si une pression basse de la tête est observée et l'ampèremètre du moteur est normal, deux conditions peuvent exister. La température des zones du baril peut excéder la température maximum établie sur le contrôle, indiquant un refroidissement insuffisant et une haute température du plastique ou la ligne du manomètre peut être défectueuse.

Certains matériaux plastiques peuvent résister à des températures sensiblement plus élevées que la fusion sans se dégrader. Cependant, la viscosité est considérablement réduite, créant de cette façon un danger de giclage à travers la filière. Par conséquent, la température outrepassée, doit être éliminée immédiatement par un contrôle approprié. Pour vérifier si la ligne du manomètre est bloquée, arrêter l'extrudeuse et avec une extrême prudence dégager la pression résiduelle et enlever lentement la jauge de pression de ligne.

Un manomètre à graissage sous pression est fourni avec une ligne de graisse à haute température convenable. Si la graisse a été remplacée par un polymère solidifié, enlever la partie solide et remplir la ligne avec une graisse à haute température recommandée et réinstaller l'indicateur dans le baril. Sous aucune condition l'indicateur ne doit être remplacé en insérant un bloc dans le baril. Une jauge sensible à pression doit être vérifiée pour malfonctionnement explicite tel qu'indiqué dans le manuel d'instruction.

Une soudaine augmentation de pression normalement accompagnée d'une changement de pression de moteur indique une des conditions suivantes: température trop basse de préchauffage de certaines zones de chaleur, température basse d'opération; matériel étranger causant une obstruction dans le baril, filière ou autre accessoire monté sur l'extrudeuse, un filtre malpropre, une grille sale. Chaque fois qu'une pression excessive est indiquée, fermer l'extrudeuse immédiatement, trouver la cause et y remédier. Se souvenir qu'une pression excessivement haute ne sera pas nécessairement accompagnée d'une augmentation de tension au moteur. Ne jamais opérer une extrudeuse avec une pression excessive. L'extrudeuse peut développer une pression extrêmement élevée; cependant, elle doit être contrôlée afin de prévenir de sérieuses blessures aux employés.

Bien qu'il a été spécifié que les conditions et observations mentionnées précédemment doivent être respectées pendant le préchauffage de l'extrudeuse et le démarrage, il faut être prêt à assurer une opération sécuritaire de l'extrudeuse. Elles sont d'une importance égale durant l'opération de production d'une extrudeuse et doivent être appliquées en tout temps afin de maintenir une opération sécuritaire.

ACCESSOIRES DE SECURITE

En plus, il y a d'autres endroits et équipements rajoutés sur l'extrudeuse qui demandent une prudence extrême lorsqu'en opération pour prévenir les blessures aux employés.

Filières, mélangeurs, changeurs de filtre, tuyaux de transfert et composants reliés sont installés sur la tête de l'extrudeuse, c'est ici que les effets de la température, pression et la torque se convergent pour produire le profilé ou la base pour une opération additionnelle.

Par conséquent, lorsque l'opérateur est dans l'aire, il doit être complètement au courant des risques résultants de la température élevée, d'une pression excessive, des gaz et vapeurs s'échappant et la possibilité d'un feu éclair.

L'opérateur pendant qu'il est dans l'aire de la tête de l'extrudeuse, doit porter des vêtements protecteurs et un équipement pour prévenir des blessures et il est absolument obligatoire qu'il ne passe que le temps minimum requis dans cet endroit.

Diverses méthodes sont utilisées afin de prévenir les dommages et les blessures causées par une pression extrême de la tête, telles que filière étant montée avec verrous qui se brisent sous pression, d'orifice d'échappement et rondelles de rupture dans les barils, et méthodes de fermeture si pression excessive. Il est obligatoire que des remplacements soient faits seulement avec un appareil approuvé. Garder l'orifice de saignage propre, ne jamais obstruer les évents et les disques de rupture libres.

L'enlèvement des filières, l'ouverture des crampons de têtes et toutes les opérations dans l'aire de la tête de l'extrudeuse doivent être exécutées avec une extrême prudence. Même lorsque l'extrudeuse a été fermée et refroidie, le danger de pression résiduelle de la tête est toujours présent. Par conséquent, l'enlèvement de l'équipement monté sur la tête de l'extrudeuse doit être exécuté avec précaution, permettant le dégagement graduel de pression et l'échappement possible de gaz. PERSONNE NE DEVRAIT SE TENIR EN AVANT D'UNE EXTRUDEUSE.

Changer l'écran d'un filtre et la plaque trouée dans la tête de l'extrudeuse présente un risque encore plus grand étant donné que cette opération est faite avec l'extrudeuse à sa température approximative d'opération. Donc, préparer d'avance tous les outils requis, un filtre propre et avoir en tête une méthode de procédure prédéterminée avant d'effectuer ce changement et y procéder avec une

extrême prudence. En tout temps, se tenir à une certaine distance de la tête de l'extrudeuse et être vigilant à la possibilité d'expulsion du filtre et de la plaque trouée.

Les barils ventilés de l'extrudeuse sont utilisés pour aspirer les gaz volatiles tels que vapeurs de monomères, l'humidité et gaz du plastique en fusion pour améliorer l'apparence et la qualité de l'extrusion. Les barils sont ventilés dans l'atmosphère ou par le vide. La première exigence est de connaître les caractéristiques physiques et chimiques des additifs et autres composants dans le matériel à être traité et la nature des vapeurs ou volatiles et les gazs qui peuvent être relâchés pendant le procédé d'extrusion. Sont-ils plus lourds ou plus légers que l'air? Sont-ils inflammables, explosifs ou corrosifs? Cette information devrait être obtenue par le fournisseur du matériel, afin que les précautions nécessaires soient prises et aviser l'opérateur des procédures de sécurité à être suivies.

Si la ventilation se fait à l'atmosphère ou par le vide, il est obligatoire que personne ne soit autorisé à se tenir en avant de l'évent ou regarder dans l'évent durant l'opération à cause des dangers de vapeurs relâchées et la possibilité que le matériel en fusion soit expulsé par l'évent. Si le nettoyage du vent est nécessaire ou l'enlèvement d'un encombrement doit être fait avec une extrême prudence et l'opérateur doit porter des vêtements protectifs, gants et protecteur de visage. Le nettoyage doit être fait avec une sonde à manche longue en plastique ou en bois, de préférence en plastique. Ne jamais insérer les mains dans l'orifice de l'évent. Regarder directement dans l'orifice de l'évent doit être évité.

Dans un système de ventilation à vide, le couvert d'ouverture de l'évent ne doit jamais être forcé ouvert lorsque le système est en marche car des dommages peuvent survenir aux surfaces des scellants de l'évent et du couvert. De tels dommages peuvent causer un vide inefficace.

Antérieurement au nettoyage de l'évent, la pompe à vide doit être fermée permettant au couvert de l'évent d'être facilement enlevé. Comme précaution supplémentaire de sécurité, la pompe à vide doit être en marche et fonctionner durant l'opération de nettoyage, sans que le couvert soit en position pour assister à l'enlèvement des vapeurs et d'autres émanations toxiques.

Le changeur de filtre est une pièce d'accessoire d'équipement montée sur l'extrémité de la décharge du baril de l'extrudeuse pour filtrer le matériel en fusion pendant l'extrusion. Typiquement, les changeurs de filtre sont dessinés pour changer le filtre en dedans d'une (1) seconde, utilisant un système de puissance hydraulique avec une accumulation d'huile pour exécuter cette fonction. Donc, une grande force, agissant à haute vitesse, est présente. Une précaution constante et une conscience de la vitesse doit être gardée à l'esprit durant l'opération des changements de l'écran.

Le changeur de filtre ne doit jamais être opéré avec les gardes enlevés et/ou la barrure du garde fourni sur certains changeurs dans une condition non-opérationnelle. La barrure du garde doit être vérifiée périodiquement pour s'assurer qu'elle est en bonne condition d'opération et fonctionnelle. En aucun temps, placer les mains dans la trajectoire d'expulsion du filtre. Avant d'opérer la plaque coulissante, l'opérateur doit prendre soin de s'assurer que personne ne se trouve dans la trajectoire de la plaque, dans le cas où elle serait forcée par la pression, car elle peut causer des brûlures sévères et blessures aux personnes proches. L'opérateur devrait se tenir en arrière ou à côté du cylindre hydraulique, lorsqu'il active la soupape. Un garde-visage complet doit être porté par l'opérateur durant l'opération du changement de filtre.

Si l'entretien doit être fait sur le changeur de filtre ou la fermeture du changeur est anticipée, il est absolument nécessaire de fermer la puissance hydraulique et de décharger la charge dans l'accumulateur. Si la charge n'est pas déchargée, le système sera

sous pression. Un mouvement accidentel de la soupape sous ces conditions déchargera l'accumulateur permettant au cylindre de frapper quiconque aura les mains ou le corps près de la plaque. Une sécurité additionnelle peut être effectuée en gardant la pression hydraulique dans le système seulement lorsque le changement de filtre est anticipé en fermant la puissance hydraulique et déchargeant la charge dans l'accumulateur.

EQUIPEMENT DE POST-EXTRUSION

Les méthodes de sécurité et précautions recommandées doivent être utilisés et toujours garder à l'esprit pendant une opération pertinente à l'équipement et aux méthodes qui comprennent une ligne complète pour le procédé de post-extrusion pour le film formé ou soufflé, feuilles, rubans fendus, monofilament, embobinage et enroulement. Les principes de base d'opération et méthodes de transport du produit sont semblables dans ces procédés. Par conséquent, les méthodes suivantes d'opérations de sécurité et précautions sont applicables pour chacun.

L'opérateur doit connaftre la fonction, le but et la location des contrôles, des commutateurs et des indicateurs sur le panneau de contrôle de l'équipement.

L'opérateur doit toujours être au courant de la location des cordes d'arrêt d'urgence, barres de relâche de sécurité, les boutons d'arrêt, contacts démarreurs et autres méthodes de sécurité. Aussi il doit avoir pleinement conscience de l'action qui est initiée lorsque l'appareil de sécurité est mis en marche (les pouvoirs électrique et pneumatique sont ouverts même lorsque la puissance est fermée).

Tous les gardes doivent être en position et tout appareil de sécurité fonctionnel. Une opération périodique des appareils de

sécurité doit être faite pour assurer qu'ils sont en bonne condition d'opération.

Une extrême prudence doit être utilisée lorsqu'à proximité des rouleaux de pinces. Etre toujours conscient de la location des appareils d'arrêt d'urgence de sécurité. Ne jamais placer les mains sur la courroie ouverte des pinces entre les rouleaux.

Ne jamais entrer dans l'équipement pour entretenir ou pour enfiler à moins qu'il soit absolument certain que tous les approvisionnements électriques et pneumatiques soient fermés et que chaque membre mobile soit barré en place.

Toute opération d'enfilage doit être exécutée avec les rouleaux en position ouverte et les rouleaux tournant à vitesse lente. Ne jamais placer les mains dans la pince ouverte ou les avancer à travers la pince ouverte. L'enfilement doit être fait avec une remorque pour guider le ruban d'extrusion à travers le pince ouverte. Il est fortement recommandé que l'opération d'enfilage soit exécutée par deux (2) personnes, avec une personne postée aux contrôles jusqu'à ce que l'enfilage soit complété.

Lorsqu'un enroulement survient, ne jamais tenter de dégager l'enroulement avec la pince des rouleaux fermés. Les pinces de rouleaux doivent être ouvertes et l'enroulement enlevé en tirant le bord du rouleau. Utilisez des gants de sécurité. Ne placez pas les mains dans une pince ouverte. Par mesure de sécurité, ARRETEZ le moteur des rouleaux quand vous enlevez un enroulement.

Lorsqu'un enroulement survient sur un film fermé ou sur un rouleau de pince de l'extrusion, enlever l'enroulement immédiatement, ouvrir la pince, fermer la puissance du moteur et réduire la vitesse de l'alimentation de l'extrudeuse. Prudemment, enlever l'enroulement tel que suggéré précédemment.

Se méfier des nombreux couteaux, des rasoirs coupeurs ou autre appareil coupant qui sont utilisés dans une ligne de traitement. Ces rasoirs sont destinés à couper efficacement. Ne jamais mettre les mains sur la surface de la bande sans aucune raison. Etre constamment éveillé aux divers coupeurs. Savoir où sont vos mains en tout temps pendant l'opération quand vous réparez l'équipement.

Se tenir sur l'équipement doit être STRICTEMENT INTERDIT. Une échelle ou un échafaudage doit toujours être utilisé.

Un traitement du produit en ligne continue étant traité par une méthode de décharge de Corona, engendre des ozones qui doivent être enlevés par un système effectif de ventilation. Les traiteurs doivent être fermés pendant chaque interruption de la ligne de traitement, spécialement durant une opération d'enfilage. Seulement lorsqu'il est certain que tout le personnel est loin de l'endroit du traitement, le traiteur peut être ouvert. Seul le personnel autorisé peut faire les ajustements nécessaires ou réparations du traiteur. Chaque traiteur doit avoir une mise à terre.

TOUR DE FILM SOUFFLE

Seul le personnel autorisé a la permission sur les tours de refroidissement du film et lorsque leurs fonctions spécifiques requièrent qu'ils soient à cet endroit.

Les endroits de travail devraient être placardés avec des enseignes d'avertissement quand il y a du personnel en haut de la structure. Tout personnel travaillant en dessous d'une tour de structure devrait porter en tout temps un casque protecteur approuvé.

Durant la période de traitement du film, la tour devrait être placardée concernant le risque de haute tension et seul le personnel autorisé ayant l'entraînement requis peut utiliser la structure.

Lors de réparations au mécanisme sur les plates-formes, un plancher solide temporaire devrait être étendu au-dessus de l'appareil.

TOURNAGE ET EMBOBINAGE

L'opérateur doit comprendre l'opération d'un mandrin pour les essieux des tourets et des moulinets. ETRE SUR que l'endroit d'opération est propre avant d'initier d'autres fonctions d'enroulement. Toujours emballer le tourneur avec un câble remorque avant de commencer, pour permettre au produit d'être tiré dans l'enrouleur au début de l'opération.

Au cours de l'indexation automatique de la tourelle, une alarme devrait être sonnée pour avertir les employés de se tenir à distance. Lorsque vous indexez la tourelle manuellement, soyez certain que tous les employés sont dans un endroit sécuritaire.

Ne jamais étendre à travers l'équipement de la tourelle un bras ou une autre partie du corps pour ficeler le produit. Un câble remorqueur en plastique doit toujours être utilisé.

Durant l'opération de déchargement, un soin particulier doit être exercé pour éviter d'endommager l'équipement et échapper le rouleau de film en employant une force excessive de hissement sur les mandrins. Etre absolument certain que les ceintures et autres moyens de maniement sont en position respective avant d'effectuer la levée.

Il est fortement recommandé, quand il est nécessaire d'entrer dans l'endroit de travail d'une enrouleuse, EN TOUT TEMPS, qu'une personne soit située à la station jusqu'à ce que l'endroit soit libre. Avant d'entrer dans l'aire, être absolument certain que les lignes d'approvisionnement électrique et pneumatique sont verrouillées et étiquetées.

EN RESUME

Un opérateur qui est bien entraîné et comprend à fond la fonction et l'opération de l'équipement qui lui est assigné, peut travailler en sécurité et efficacement.

Un endroit propre contribue à la sécurité contre les dangers de blessures qui sont grandement minimisés.

Gardes et méthodes de sécurité ne sont pas permis d'être enlevés à cause d'une plus grande accessibilité. Il devrait plutôt être considéré comme un avertissement d'un danger possible. Tout avertissement, précaution et symbole d'instruction qui sont montés sur l'équipement doivent être obéis et ne jamais être effacés, peinturés ou enlevés.

Leurs affichages servent seulement à un but: notamment, la prévention d'un accident. Aussi, ils servent d'aide-mémoire rappelant constamment aux employés que les mesures de sécurité doivent toujours être pratiquées.

Les manuels d'instruction concernant l'opération de l'équipement tel que fournis par le manufacturier, sont une excellente source d'information pour un programme d'entraînement. Ces manuels devraient être gardés à portée de la main.

LEXIQUE

ABS	ABS (Acrylonitrile-butadiène-styrène)
Adaptor	Raccord
Air vent	Event
Air ring	Anneau de refroidissement
Angle of incidence	Angle d'incidence
Annular die	Filière annulaire
Barrel	Cylindre Fourreau
Barrel heater	Chauffage du cylindre
Batch	Lot
Blenders	Mélangeurs
Bottom fed die	Filière alimentée par le bas
Breaker plate	Plaque porte-filtre; grille
Bursting pressure	Pression d'éclatement
Bursting Strength	Résistance à l'éclatement
Burned	Brûlé
Channel depth	Profondeur de filet
Coefficient of linear expansion	Coefficient de dilatation linéaire
Coil	Rouleau
Compound	Compound composé
Conpounding	Compoundage
Compression ratio	Taux de compression
Contamination	Contamination
Cracking	Fendillement
Cramer Feeder	Trémie avec alimentation forcée

Cycle	Cycle
Degradation	Dégradation
Degree of dispersion	Degré de dispersion
Density	Densité
Dew point	Point de condensation
Die	Filière
Die-adaptor	Raccord de filière
Die-Block	Tête de filière
Die-body	Corps de la filière
Die lines	Lignes de filière
Die lip	Lèvre de filière
Die orifice	Orifice de la filière
Dispersion	Dispersion
Draw distance	Longueur d'étirage
Draw Down	Etirage
	Vitesse de réception maximum
Draw ratio	Rapport d'étirage
Dry coloring	Coloration à sec
Drying oven	Etuve
Dyes	Colorants
End fed die	Filière alimentée par le côté
Extrusion die	Filière d'extrusion
Extrusion	Extrusion
Extruder	Extrudeuse
Extruder support	Bâti
Extrudate	Produit d'extrusion

Feed throat	Goulotte d'alimentation
Film	Film, gaine
Flat die	Filière plate
Flight	Filet
Flow	Ecoulement
Flow direction	Direction de l'écoulement
Flow line	Ligne d'écoulement
Flow mark	Marque de fluage
Flow pattern	Aspect de fluage
Flow temperature	Température de fluage
Fusion temperature	Température de fusion
Gage	Jauge
Haul-off speed	Vitesse d'étirage
Haul-off	Etirage
Head	Tête
Heater	Elément chauffant
Heating cylinder	Cylindre de chauffage
Hopper	Entonnoir
	Trémie
Hopper dryer	Trémie de séchage préliminaire
Hopper loader	Ravitailleur de trémie
Impact resistance	Résistance au choc
Land	Canal de filière
Linear polyethylene	Polyéthylène linéaire
Low density	Basse densité
Maintenance time	Temps d'entretien

Masterbatch	Mélange maître, concentré
Melt fracture	Rupture de fluage
Melt index	Indice de fluage
Metering type screw	Vis avec zone d'homogénéisation; pompage
Mixing	Mélange
Moisture	Humidité
Number of revolutions	Nombre de tours-minute
Off-grade	Matière de choix inférieur
Output	Rendement
Packaging	Emballage
Particle	Particule
Particle size	Grandeur particulaire Dimension des grains
Pigments	Colorants
Pin (die)	Broche
Pipe	Tuyau
Pipe fitting	Joint pour tuyau
Polyethylene (PE)	PE (Polyéthylène)
Polymer	Polymère
Polypropylene (PP)	PP (Polypropylène)
Processing	Fabrication
Profile	Profil
Polystyrene (PS)	PS (Polystyrène)
Purging	Purge
PVC	PVC (Chlorure de polyvinyle)

Reground material	Matériau régénéré
Resin	Résine
Room temperature	Température ambiante
Scrap	Déchet
Screen pack	Tamis
Screw	Vis
Screw flight	Filet de la vis
Screw land length	Largeur du filet
Screw speed	Vitesse de rotation de la vis
Sheet	Feuille
Sizer	Appareil de calibrage
Sizing	Calibrage
Sizing plates	Plaques de calibrage
Spider	Support
Stock temperature	Température de la matière à la sortie de l'extrudeuse
Surging	Effet par-à-coups
Taper	Conicité Dépouille
Thermocouple	Thermocouple
Thermoset	Thermodurcissable
Thermoplastic	Thermoplastique
Tolerance	Tolérance
Twin-screw	Double vis
Vacuum sizing	Calibrage sous vide
Valve	Valve

Venting	Dégazage
Vents	Events
Wall thickness	Epaisseur de paroi
Water cooling	Refroidissement de l'eau
Zone	Zone

COURS DE MOULAGE PAR INJECTION

PAR

Dr. B. Sanschagrin

COURS DE MOULAGE PAR INJECTION

I. LA PRESSE A INJECTION

Qu'est-ce que le moulage par injection?

L'injection se caractérise par le remplissage sous forte pression d'une empreinte quelconque par une matière fondue susceptible de s'écouler. L'injection contrairement à l'extrusion est un mode de transformation discontinu de la matière

Configuration d'une presse à injection (Fig. 1)

A - Partie fermeture (Fig. 2)

Cette partie de la presse est responsable des mouvements du moule lors du cycle d'injection. Par leur nature, il existe trois types de système de fermeture:

1) Fermeture hydraulique

Généralement ce dispositif comprend deux sortes de vérin. La première étant des vérins longs à double actions et de section réduite avec des déplacements importants pour de faibles efforts. La seconde étant des vérins courts à simple action de section importante avec de faibles déplacements pour de grands efforts. Ce système nécessite un apport d'huile au niveau des vérins de fermeture durant tout le cycle d'injection pour compenser les fuites qui apparaissent après un certain temps d'utilisation.

Les avantages de ce système sont:

- Une force variable et lisible en tout temps;
- Une vitesse contrôlable et dans les deux directions;
- Un contrôle de la course de fermeture;
- Une accélération et une décélération progressives;
- Une sécurité par pression limitée;
- Un montage de moule facilité;
- Un entretien et une usure minimisés;

et ses désavantages sont:

- Système onéreux à l'achat;
- Un coût d'opération plus élevé.

2) Fermeture mécanique

Par un système de genouillères actionné par un petit vérin hydraulique on vient étirer les colonnes de guidage du plateau porte-moule. La déformation élastique de ces colonnes crée une force servant à fermer les deux parties du moule. Les avantages de ce dispositif sont:

- Nécessité d'un cylindre hydraulique beaucoup plus petit;
- Courbe de vitesse inhérente au système;
- Possibilité de blocage automatique si on dépasse le point d'équilibre;
- Coût relativement faible;

et les inconvénients sont:

- Un réglage difficile et la possibilité d'appliquer une force de fermeture trop grande;
- Une modification de la force de fermeture causée par une variation de la température;
- Les forces et les vitesses du système sont difficilement contrôlable ainsi que les points de départ et d'arrêt;
- Nécessite plus d'entretien;
- Plus sensible à l'usure.

3) Fermeture mixte (mécanique et hydraulique)

Une genouillère autorise un grand déplacement du plateau porte-moule et un ou plusieurs vérins hydrauliques appliquent la force de fermeture sur le moule pendant l'injection.

De par sa conception, le système à genouillères est bien adapté aux déplacements importants car il évite les à-coups dans la structure, les

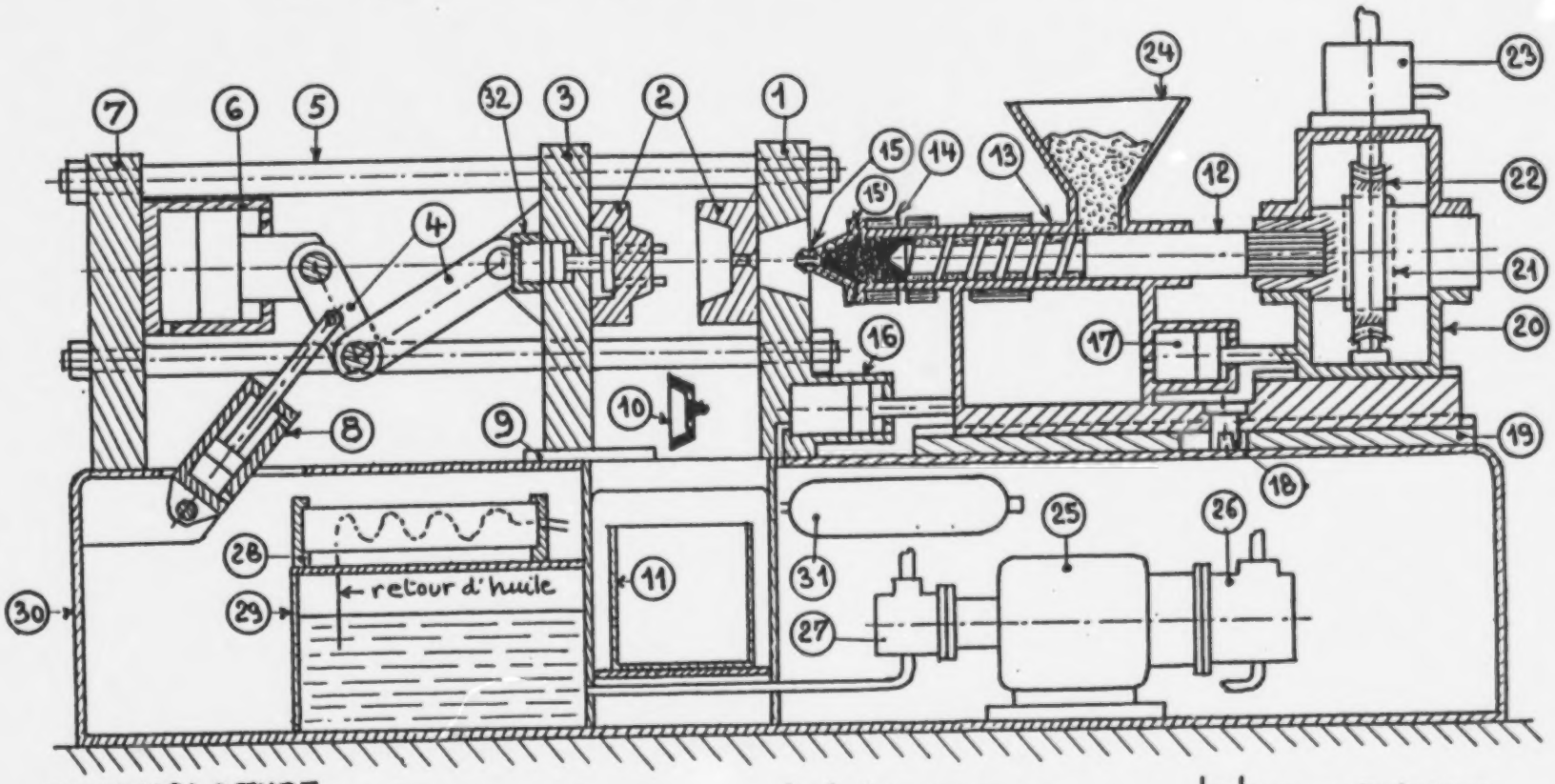
vitesses de départ et d'arrivée étant lentes. Notons que la genouillère est limitée en déplacement maximum.

Chaque type de fermeture présente plusieurs solutions correspondant au choix des constructeurs ou à des capacités de presse différentes.

De plus cette partie comprend un système d'éjection de (ou des) pièce(s) moulée(s) qui peut être hydraulique ou mécanique. Quelquefois on associe des jets d'air comprimé au système déjà existant pour des cas limites.

FIG:1

PRESSE A INJECTER LES MATIERES THERMOPLASTIQUES



NOMENCLATURE

1	Plateau d'injection
2	Moule
3	Plateau mobile
4	Genouillère
5	Colonne
6	Vérin de fermeture
7	Sommier ou plateau AR
8	Vérin d'approche
9	Patin de frottement
10	Pièce moulée
11	Bac de stockage des pièces moulées
12	Vis de plastification
13	Cylindre de plastification
14	Résistance chauffante.
15	Buse d'injection.
15'	Nez de cylindre
16	Vérin d'avance et recul du bloc d'injection
17	Vérin d'injection
18	Axe de pivotement du bloc d'injection
19	Glissière
20	Carter coulissant
21	Vis sans fin
22	Roue à vis sans fin
23	Moteur hydraulique
24	Trémie
25	Moteur électrique
26	Pompe basse pression
27	Pompe haute pression
28	Refroidisseur d'huile.
29	Réservoir d'huile
30	Bâti ou châssis.
31	Accumulateur.
32	Vérin d'éjection

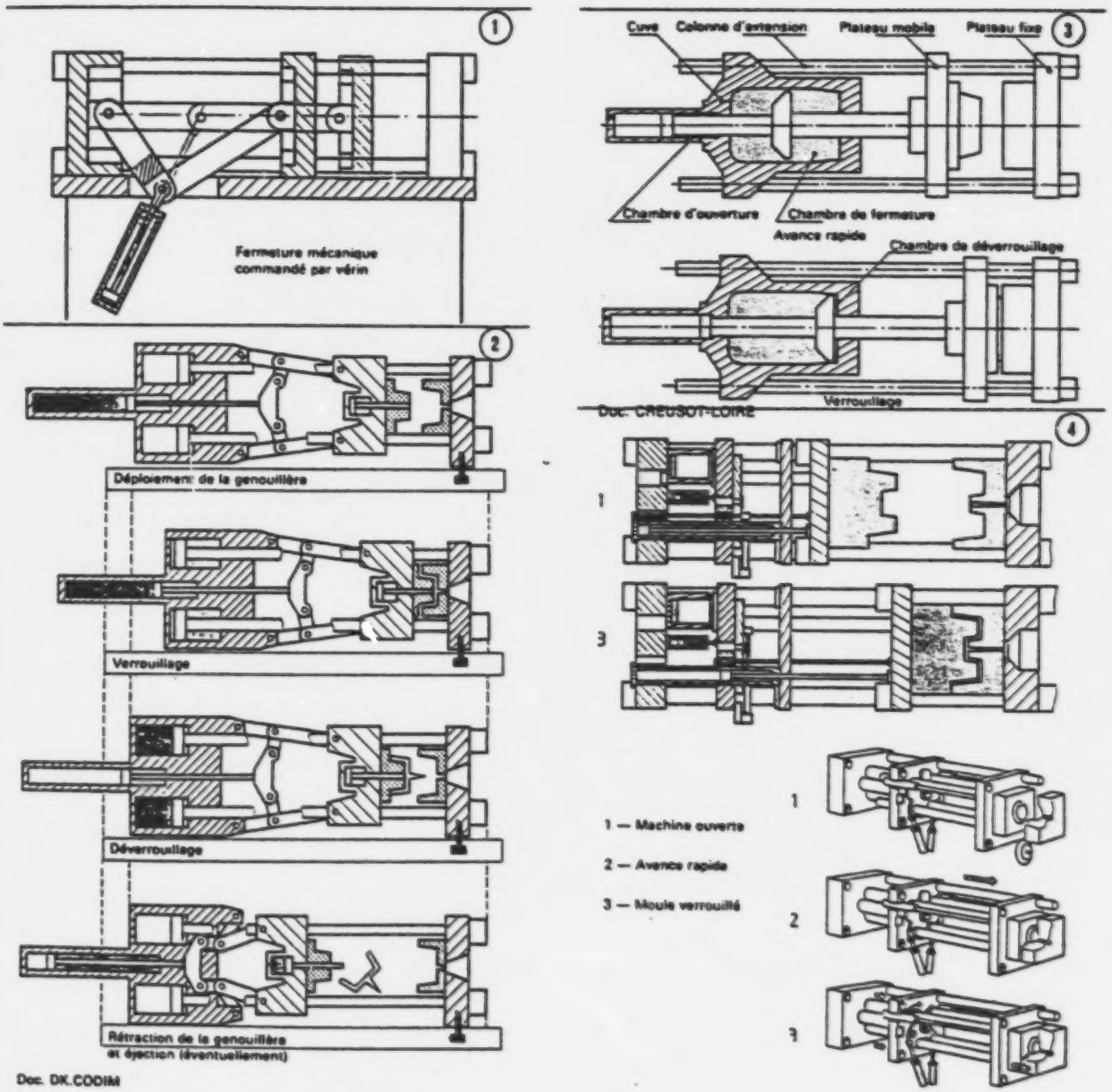


Fig. 2 Systèmes de fermeture

B - Partie plastification-injection

Le rôle de la vis de plastification

Cette figure montre les différentes étapes de la plastification.

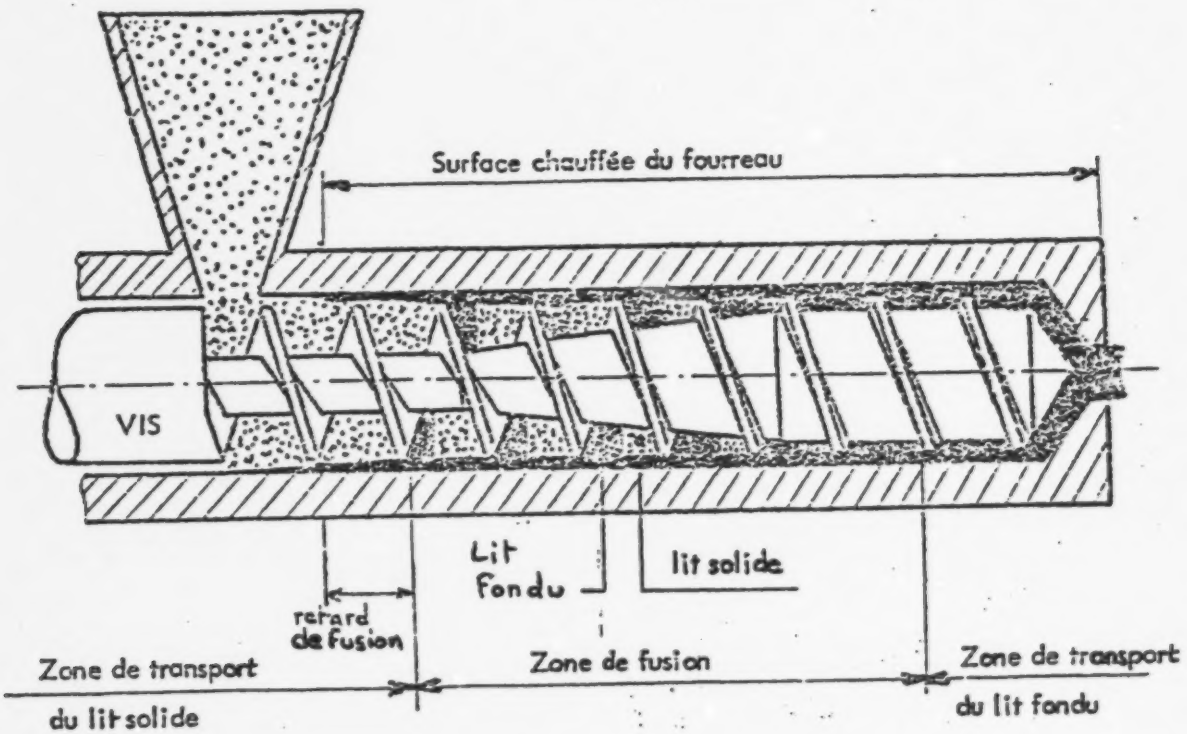


Fig. 3 Unité de plastification

D'abord une zone de transport du lit solide où les frottements entre matière - fourreau et matière - vis sont tels que la matière est transportée vers l'avant.

Une zone de retard de fusion qui est comprise dans la zone de transport et où il y a formation d'un film de polymère fondu sur la paroi du fourreau. Cette zone s'étend jusqu'au moment où le film devient supérieur au jeu qui existe entre le filet de la vis et le fourreau. Commence alors la zone de fusion où l'évolution du lit solide peut prendre plusieurs formes suivant les hypothèses de calcul, les conditions d'opération et les produits utilisés.

Dans les figures suivantes, nous présentons deux hypothèses différentes sur le remplissage du filet dans la zone de fusion.

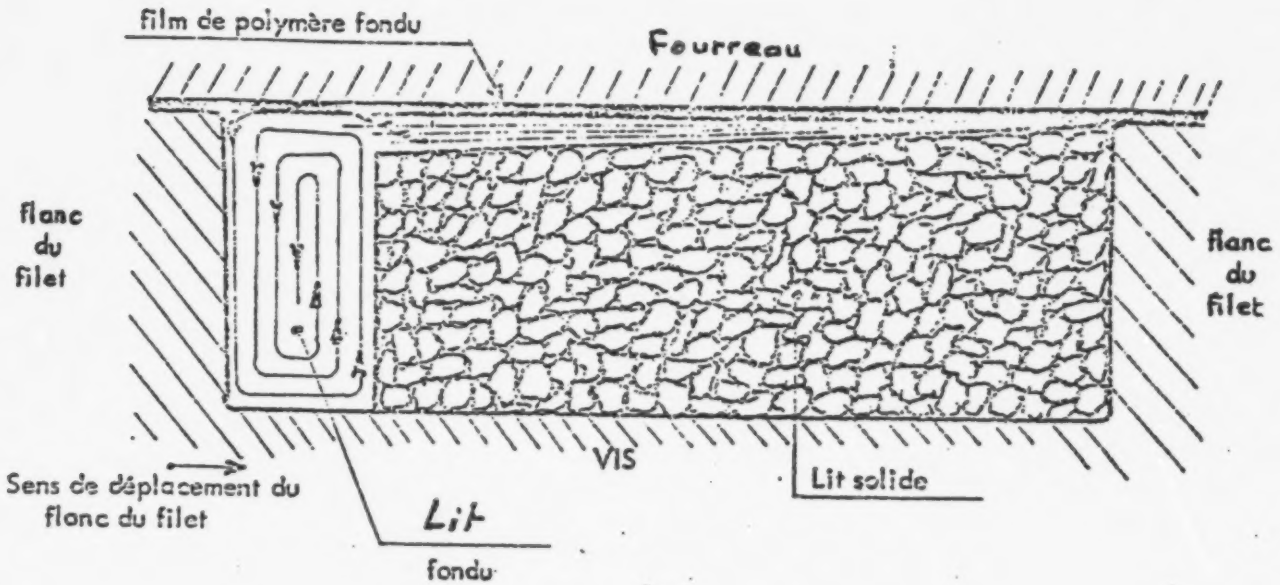


Fig. 4 Zone de fusion

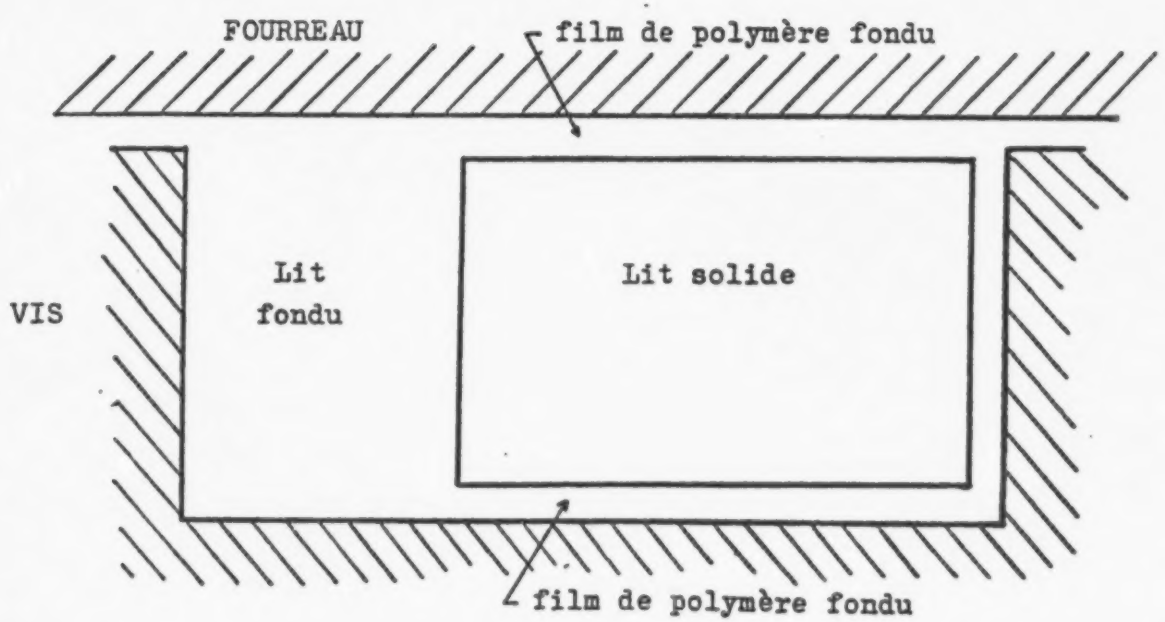


Fig. 5 Zone de fusion

La chaleur faisant fondre les granulés provient du ou des films de matière fondue et du lit fondu. Cette chaleur provient d'une part du fourreau et de la vis (pour le deuxième cas) et d'autre part par dissipation visqueuse de l'énergie fournie par cisaillement au niveau de la matière fondue. Il a été montré que cette quantité d'énergie est proprotionnelle au carré de la vitesse de cisaillement de la matière.

De plus le phénomène de plastification dans un système vis - piston est plus complexe que dans une extrudeuse car:

a) La plastification ne se fait pas de façon continue ce qui signifie que pendant un certain temps seul le phénomène de conduction est existant et que les forces de cisaillement sont négligeables. Ce temps dépendra du cycle d'injection.

b) Pendant la plastification, il y a un recul de la vis qui s'effectue au fur et à mesure que la matière s'accumule devant celle-ci. La matière entre le début et la fin du dosage n'aura donc pas parcouru le même chemin et par conséquent n'aura pas la même histoire rhéologique et thermique. De plus ce recul est fonction d'une pression appelée contre-pression qui freine ce recul de vis et ainsi améliore la plastification mais ceci ajoute encore des variables au calcul du cisaillement de la matière.

c) Au début de l'injection, il y a un mouvement de translation de la vis vers l'avant afin de chasser la matière accumulée lors de la plastification dans l'empreinte du moule. Ce mouvement est générateur d'énergie par cisaillement, dépend des conditions de moulage et aura des effets non négligeables sur le mélange.

Conclusion

Plusieurs auteurs associent l'indice de fluidité (melt flow index) de la matière au choix de la vis. Pour des matières à indice de fluidité moyen à faible on préférera des taux de compression faible (2 à 3) et pour celles à haut indice de fluidité on choisira des vis à taux de compression plus élevé (3 à 5).

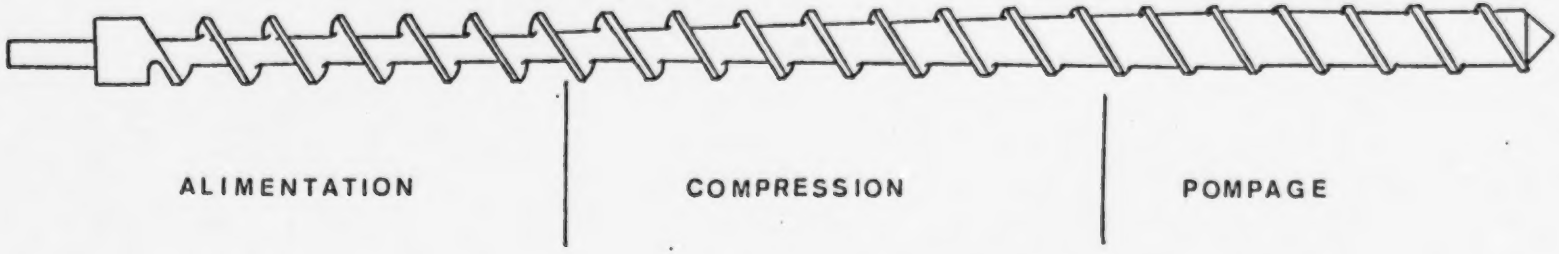
De manière générale, il est préférable d'avoir des vis à pas faible qui:

- améliore les échanges de chaleur entre le fourreau et la matière, celle-ci étant raclée plus souvent
- diminue le retour de matière durant l'injection
- peut propulser de la matière plus visqueuse avec plus d'aisance (couple appliqué sur la vis moins élevé)

et à filets peu profonds pour avoir:

- une meilleure circulation de la matière
- un meilleur mélange
- une meilleure homogénéité de la température.

Pour des dosages faibles le lit solide disparaît plus rapidement car la matière séjourne plus longtemps dans le fourreau et reçoit ainsi plus de chaleur par conduction.



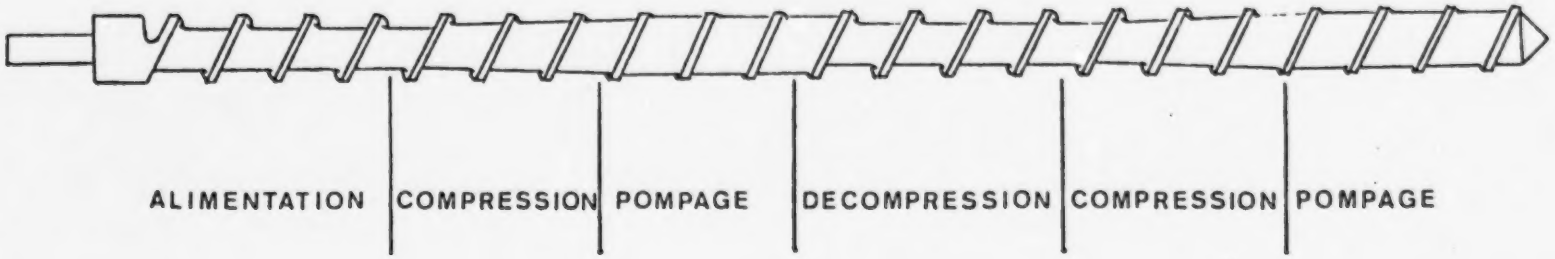
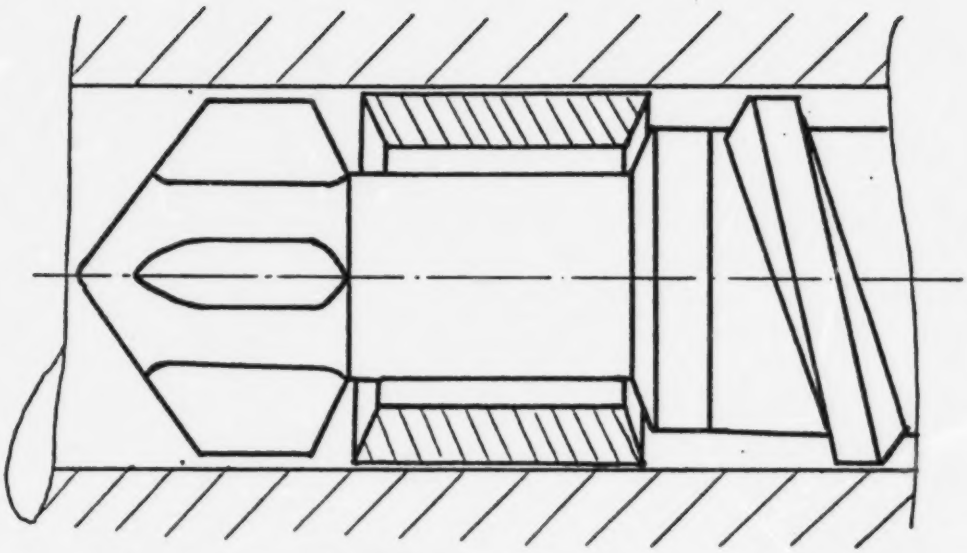
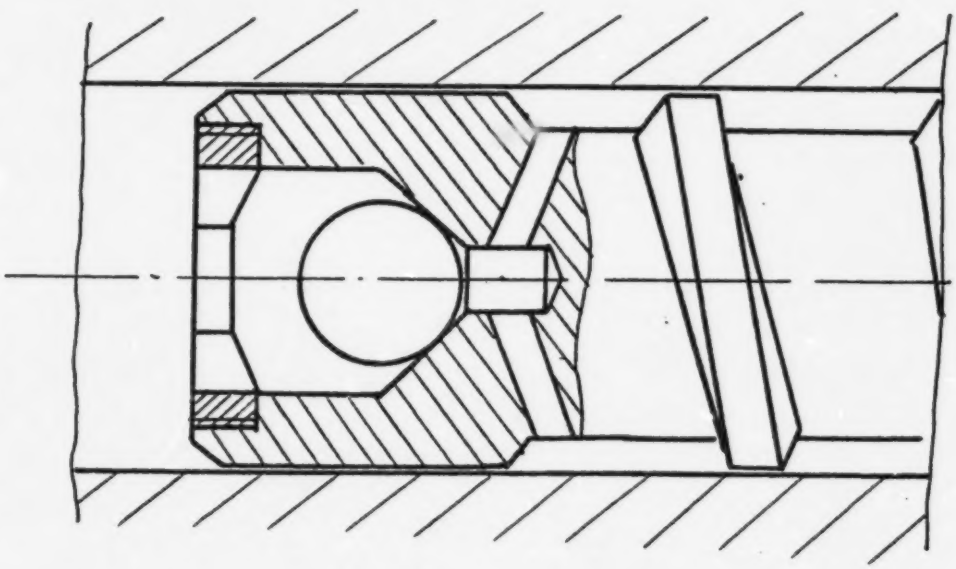


FIGURE 6 Types de vis



A ANNEAU



A BILLE

FIG.7 TYPES DE CLAPETS

II. LE CYCLE D'INJECTION

A - Description d'un cycle d'injection (Fig. 8)

Le cycle débute, le moule se ferme avec une vitesse contrôlable (vitesse de fermeture) et se verrouille avec une pression donnée (pression de fermeture) proportionnelle à la force de fermeture qu'on veut appliquer au moule.

Le ponton s'avance jusqu'à ce que la buse vienne en contact avec le moule. Aussitôt le contact établi, l'obturateur de la buse s'ouvre pour laisser passer la matière poussée par la vis à l'aide du vérin d'injection. Celle-ci avance à vitesse contrôlée (vitesse d'injection) avec une pression hydraulique maximale (pression d'injection) et un temps (temps d'injection) fixés. Puis pendant un temps (temps de maintien) donné, on applique une certaine pression (pression de maintien) à la matière; c'est la phase de bourrage. Au bout de ce temps l'obturateur se referme, le ponton recule et rompt le contact entre la buse et le moule.

La pression dans le vérin d'injection chute à une valeur plus faible (contre-pression) c'est-à-dire à la pression exercée pendant le recul de la vis. Durant la plastification la vis tourne sur elle-même avec une vitesse (vitesse de rotation de la vis) fixée et pour une distance (position du lock de dosage) donnée qui détermine le dosage en matière.

Une minuterie règle un temps (temps de refroidissement) au bout duquel le moule s'ouvre avec une vitesse (vitesse d'ouverture) contrôlable et sur une distance réglable. En fin d'ouverture on a éjection de la pièce et une minuterie règle le temps (temps entre cycle ou d'ouverture du moule) durant lequel le moule reste ouvert.

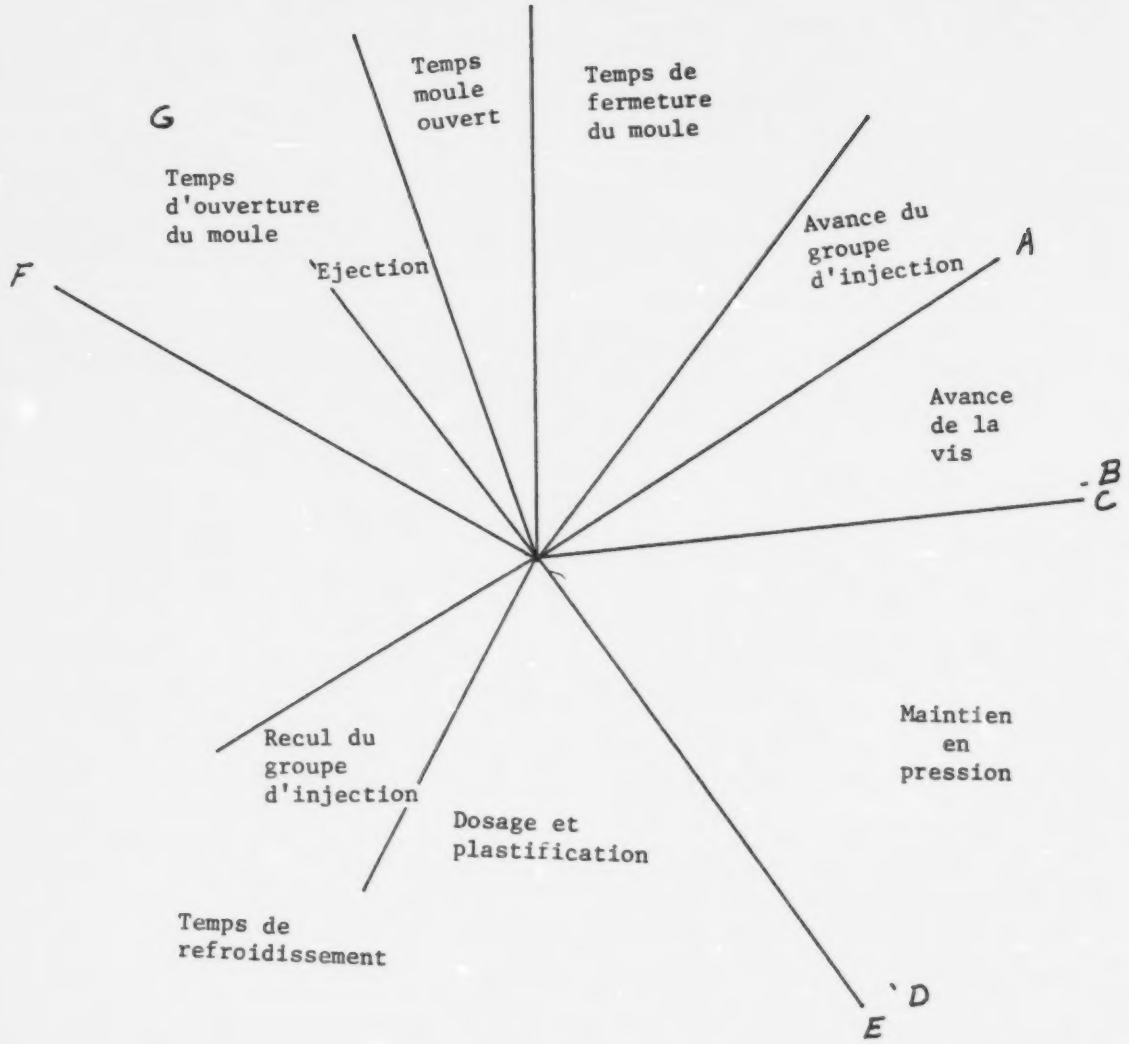
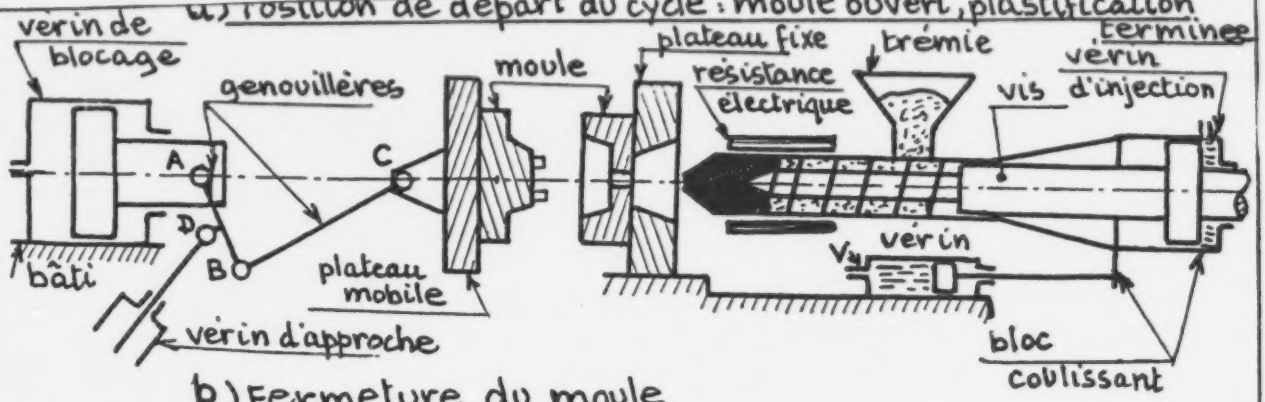
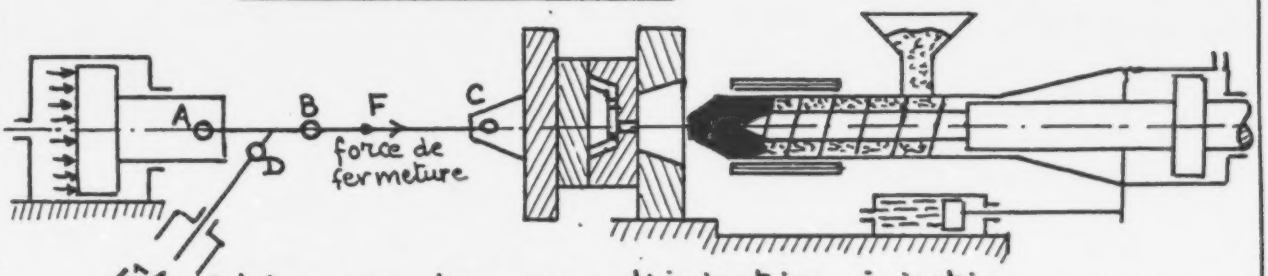


Fig. 8 Cycle d'injection

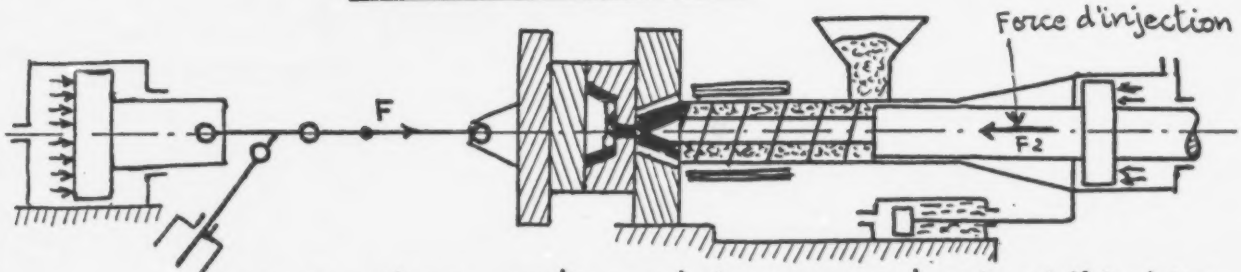
a) Position de départ du cycle : moule ouvert, plastification terminée



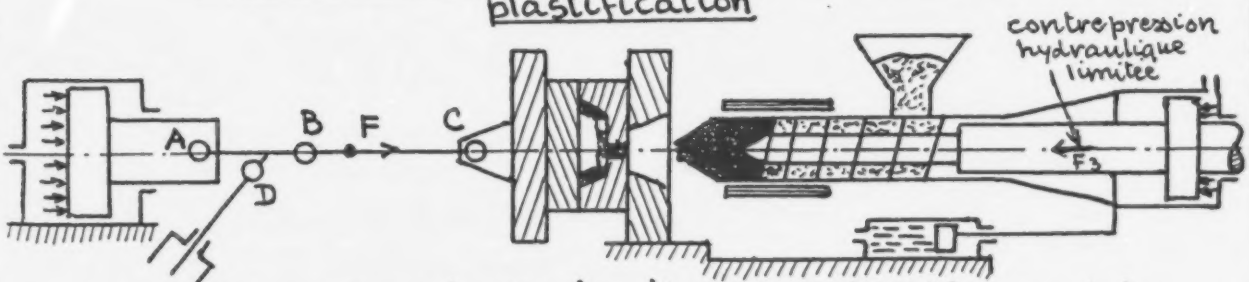
b) Fermeture du moule



c) Avance du groupe d'injection ; injection, maintien en pression



d) Refroidissement, recul du groupe de plastification, plastification



e) Ouverture du moule ; éjection de la pièce moulée.

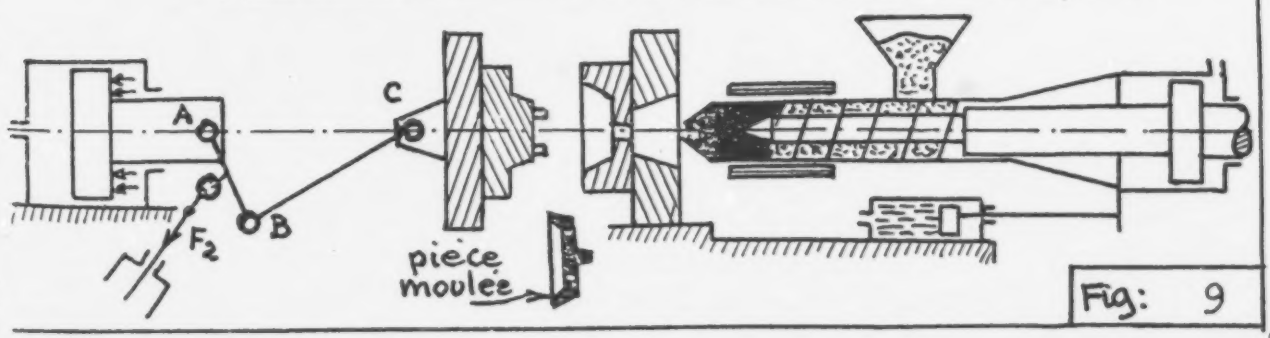


Fig: 9

SCHEMA DU CYCLE DE [illegible]

B - Remplissage d'un moule

Le remplissage d'un moule s'effectue en trois phases dites de remplissage, de bourrage et de refroidissement qui ont pour but de donner une pièce ayant les caractéristiques de forme, de dimensions et de résistances mécaniques désirées tout en tenant compte bien entendu de la matière utilisée.

1) Phase de remplissage

Dans les figures 10 et 11, cette phase correspond aux segments AC et 1 - 4 respectivement. Durant cette phase, le polymère fondu quitte l'avant du fourreau en passant par la buse d'injection pour d'abord remplir les canaux d'alimentation du moule puis traverser le ou les seuils d'alimentation et combler l'empreinte. Au fur et à mesure que la matière s'écoule, il se forme une pellicule de matière refroidie au contact des parois du moule beaucoup plus froides que le polymère. Ce phénomène produit un rétrécissement des conduits et une augmentation des forces de cisaillement. C'est durant cette phase que se produisent les phénomènes d'orientation de la matière et c'est aussi cette phase qui détermine l'état de surface des pièces injetées.

Généralement on essaie d'avoir une vitesse constante du front de matière lors du remplissage de l'empreinte. C'est pourquoi dépendant des sections et des épaisseurs, on variera la vitesse. Précisons dès maintenant que cette hypothèse est posée pour le cas idéal sachant que présentement la majorité des presses à injection n'ont qu'une seule vitesse d'injection réglable.

2) Phase de bourrage ou quasi-statique

Dans les figures 10 et 11, cette phase correspond aux segments CD et 4 - 6 respectivement.

Une fois le moule rempli, il y a une forte montée en pression et durant un certain temps on observe une avance de la vis à vitesse très réduite. La phase de bourrage à pour but de compenser le retrait de la matière lors du refroidissement de celle-ci et par conséquent de limiter le retrait total de la pièce après refroidissement.

La durée de cette phase est généralement déterminée par la section du seuil d'alimentation car dès que celui-ci est figé, il est inutile de maintenir la pression plus longtemps puisqu'aucune matière ne peut entrer dans le moule. Si par contre on a un temps de bourrage plus court que le temps de figeage du seuil, il y aura reflux de la matière vers les canaux et une chute de pression dans l'empreinte.

3) Phase de refroidissement

Le refroidissement de la pièce débute dès que la matière pénètre dans le moule mais pour des raisons pratiques, on suppose que cette phase commence après la phase de bourrage et s'étend jusqu'à l'ouverture du moule et l'éjection de la pièce.

Durant cette phase, la matière refroidit par conduction avec le moule et la pression chute en conservant une densité à peu près constante. Quand la pression devient minimale , c'est le volume spécifique qui diminue.

C'est durant cette phase que se produit les phénomènes de relaxation des contraintes internes et de désorientation des macromolécules qui tendent à reprendre leur forme optimale de "pelote statistique".

4) Diagramme de pression en fonction du temps

Soit le diagramme de la pression dans le moule en fonction du temps, on peut représenter chaque étape du cycle d'injection par un segment de la courbe.

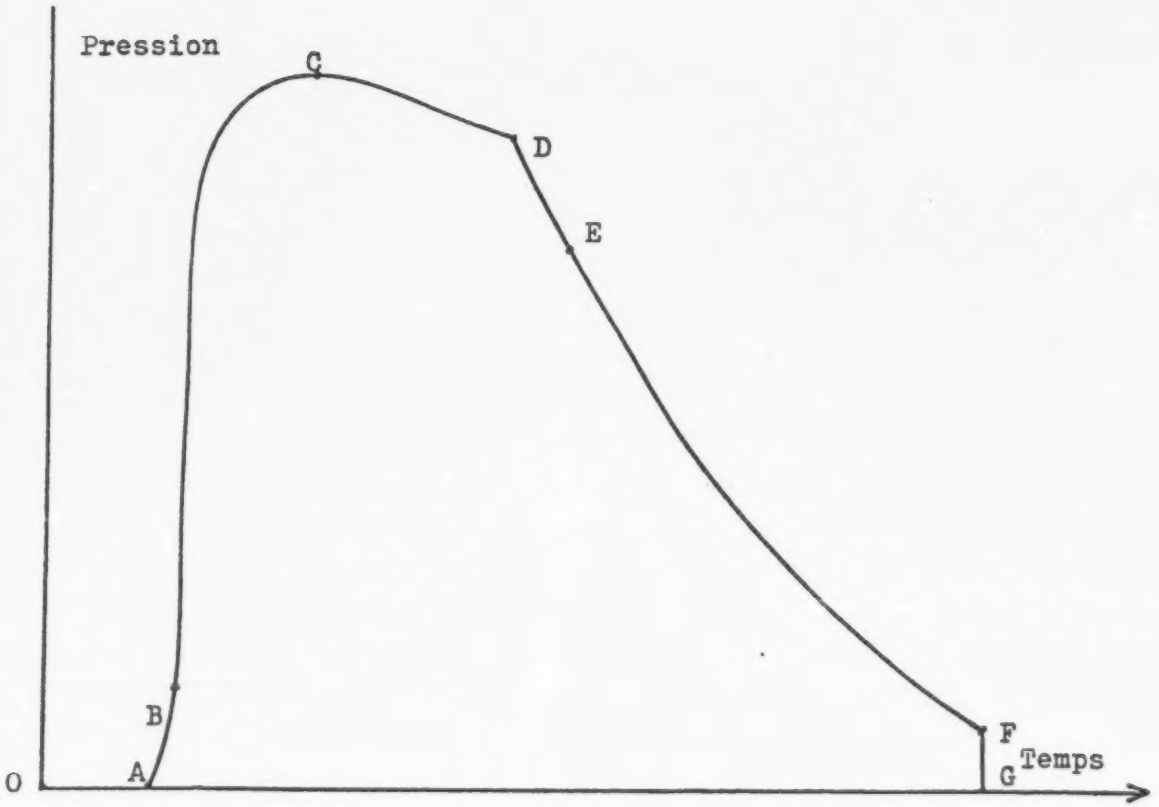


Fig. 10 Diagramme de pression en fonction du temps

où

OA - Représente le temps mort entre deux cycles.

AB - Est le remplissage proprement dit de l'empreinte. Au point B, le moule est considéré comme rempli et on observe alors une montée subite de la pression.

BC - Montée en pression provoquant une compression de la matière.

CD - Maintien de la pression sur la matière afin de compenser en partie le retrait de celle-ci lors du refroidissement.

DE - Intervale où se produit la solidification du seuil d'alimentation. Cette intervalle dépend du type de seuil (large ou capillaire "pin point"). Si le seuil n'est pas figé, on a alors reflux de la matière vers les canaux d'alimentation et la pression dans l'empreinte chute.

EF - Refroidissement de la pièce.

FG - C'est le point d'ouverture du moule et d'éjection de la pièce. La détermination de ce point est importante pour le temps de cycle et la qualité de la pièce.
Si l'ouverture se fait trop tôt, on peut avoir des problèmes de déformation de la pièce causés par les contraintes internes et/ou par l'éjection.
Si l'ouverture se fait trop tard, on a des temps de cycle trop longs ce qui augmente le coût des pièces et diminue le rendement de fabrication.

5) Diagramme de pression - volume spécifique - température

On peut également définir le cycle d'injection à partir d'un diagramme de la pression à l'entrée du moule en fonction du volume spécifique de la matière et de sa température (Fig.11), comme le fait Stitz.

Soit le diagramme pression, volume spécifique et température du polystyrène. On peut également observer les différentes phases du processus d'injection sur la courbe de cette figure. Simultanément on voit tous les états par lesquels passe la matière avant de donner la pièce finie.

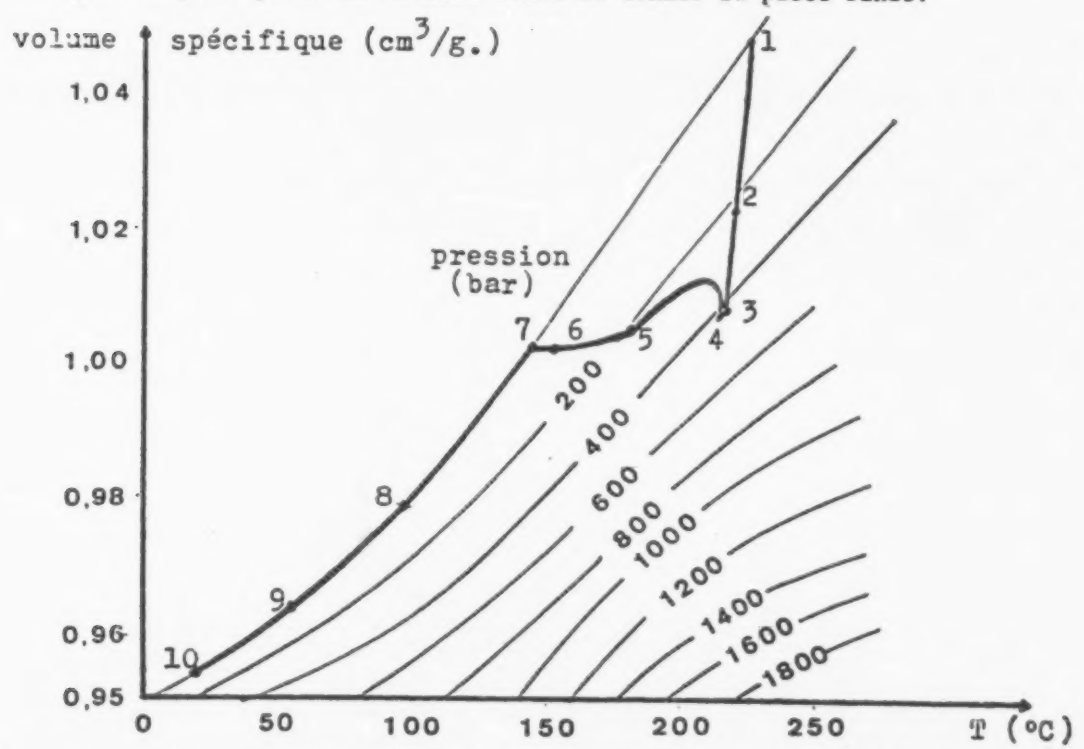


Fig. 11

On a:

1 Pression dans le moule près du seuil d'alimentation.

1 - 2 Remplissage du moule.

2 Le moule est rempli.

2 - 3 Compression de la matière.

3 La pression maximale dans le moule est atteinte (en général, elle se situe entre 300 et 1000 bars) (30 et 100 MPa).

4 Commutation injection - maintien.

4 - 5 Baisse de la pression due à la commutation; la matière reflue vers la vis.

5 La pression de maintien est atteinte.

5 - 6 Baisse de pression; compensation du retrait de la matière par la décompression pendant le refroidissement. Le bourrage du moule se poursuit et on observe une diminution du volume spécifique.

6 Figeage du seuil d'alimentation; les échanges de matière entre le moule et le fourreau sont terminés.

6 - 7 Diminution de pression causée par le refroidissement seulement.

7 La pression atmosphérique est atteinte, les parois de la pièce se décollent de l'empreinte et le retrait commence.

7 - 10 Refroidissement à pression constante.

avec:

8 La température de solidification est atteinte au point de mesure.

9 Démoulage de la pièce.

10 Volume normal atteint après démoulage.

Le retrait volumétrique dépend donc de la position du point 7.

III. LES PARAMETRES D'INJECTION ET LEUR INFLUENCE SUR LES PIECES MOULEES

A - Les températures

1) Température du moule

La température du moule peut être lue grâce à des thermocouples installés dans la masse métallique près de la surface de l'empreinte.

Cette température est contrôlée soit:

- par des régulateurs d'huile ou d'eau avec un contrôle "tout ou rien" ou plus sophistiqué
- par réglage d'un débit d'eau
- par un réfrigérant

Elle influence directement le temps de refroidissement. Une augmentation de la température du moule:

- favorise le taux de cristallinité de la pièce pour les matière semi-cristallines et par conséquent certaines propriétés mécaniques
- favorise l'écoulement dans le moule
- augmente le retrait et diminue l'anisotropie du retrait
- améliore la stabilité dimensionnelle
- diminue la précision de moulage.

2) Température de la matière

Elle peut être lue dans le fourreau ou au niveau de la buse. La lecture peut être réalisée par un thermocouple protégé par une gaine pour résister à la forte pression et aux efforts de cisaillement et qu'on introduit dans le polymère fondu. On peut également grâce à une sonde infra-rouge déterminer la température moyenne du polymère s'écoulant devant la sonde.

Le thermocouple possède un temps de réponse relativement long surtout à cause de la gaine protectrice mais c'est une solution économique.

La sonde possède un temps de réponse très court mais sa manipulation est délicate et son coût est très élevé.

Le contrôle est effectué par des régulateurs en "tout ou rien" ou avec des corrections proportionnelles, intégrales et dérivées.

L'influence de la température de la matière se fait sentir surtout sur les caractéristiques mécaniques des pièces moulées.

Une augmentation de la température de la matière provoque:

- une diminution de:
  - la viscosité de la matière
  - l'orientation de la matière
  - l'anisotropie du retrait mais augmente le retrait
  - la résistance à la traction
- une augmentation de l'allongement à la rupture

3) Température de l'huile

On a souvent tendance à négliger la température de l'huile mais c'est un paramètre qui prend beaucoup d'importance au moment des démarrages car les propriétés de l'huile changent légèrement avec la température et par conséquent modifient les réglages hydrauliques de la presse.

Les presses sont généralement équipées d'échangeurs de chaleur pour refroidir l'huile afin de maintenir celle-ci à température constante. Généralement ces systèmes ne font pas l'objet de régulation.

Certains constructeurs pour éliminer les problèmes de démarrage équipent leur presse de préchauffeurs d'huile afin d'atteindre plus rapidement la température de régime. D'autres vont jusqu'à réguler la température d'huile de leurs machines.

B - Les pressions

Toutes les pressions peuvent être lues sur des manomètres ou par l'intermédiaire de capteurs à jauges de déformation ou à cristaux piézoélectriques qui émettent un signal électrique proportionnel à la pression.

1) Pression d'injection

La pression d'injection fixée permet d'obtenir la vitesse d'injection désirée ainsi que la montée de pression en fin de remplissage. Cette pression est habituellement contrôlée par une vanne de décharge réglée manuellement à une valeur maximale.

L'augmentation de la pression d'injection:

- augmente la densité de la pièce car elle permet de faire entrer plus de matière dans le moule en fin d'injection
- diminue le retrait
- augmente l'orientation.

2) Pression de maintien

C'est la pression qu'on applique durant la phase de bourrage.

Une augmentation de la pression de maintien aboutit à:

- une diminution du retrait
- une augmentation
  - de l'orientation
  - de la densité et donc du poids des pièces
  - des contraintes internes dans la pièce.

3) Contre-pression

La contre-pression est la pression enregistrée dans le vérin d'injection pendant la plastification de la matière. Souvent cette pression est fixe durant la plastification. Elle a pour but d'améliorer l'homogénéité de la matière en augmentant les contraintes de cisaillement et la durée de la plastification.

4) Pression de fermeture

Généralement on désire que cette pression soit maintenue constante durant les trois phases de remplissage du moule. Une simple vanne de décharge à commande manuelle est satisfaisante. C'est d'ailleurs la solution retenue par la majorité des constructeurs de presse.

La pression de fermeture joue principalement sur les déformations du moule pendant l'injection. Si elle est suffisamment élevée, elle n'a que peu d'influence sur les pièces.

C - Les vitesses

1) Vitesse d'injection

C'est la vitesse réglée durant la phase de remplissage. Cette vitesse peut être enregistrée soit:

- par potentiomètre linéaire ou rotatif
- par capteur inductif
- par décodeur optique.

Ces capteurs associés à la vis mesurent un déplacement et envoient un signal électrique pouvant être traité afin de fournir une indication de la vitesse

- par capteur de vitesse

Le capteur de déplacement peut aussi servir à la mesure du dosage de la matière.

Une augmentation de la vitesse d'injection:

- améliore l'état de surface sauf en écoulement turbulent lors de la formation d'un jet de matière
- facilite le remplissage du moule
- augmente l'orientation
- change la position des lignes de soudure
- fait varier les dimensions de la pièce

2) Vitesse de rotation de la vis

Cette vitesse est généralement donnée par un tachymètre. Les moyens d'action sur cette vitesse dépendent surtout du type d'entraînement (moteur électrique ou hydraulique).

L'influence de la vitesse de rotation de la vis se fait sentir principalement sur la plastification de la matière en faisant varier les taux de cisaillement et aussi la température de la matière.

3) Vitesses d'ouverture et de fermeture du moule

Ces vitesses sont reliées directement au système utilisé. Elles doivent être choisies de façon à préserver l'outillage si une anomalie se produit et pour obtenir les temps de cycle les plus courts possibles.

Ces vitesses sont ordinairement lentes au début, rapides durant la portion centrale du déplacement et faibles en fin de course.

Généralement ces vitesses ne sont pas enregistrées et sont réglées soit par des restrictions variables à commande manuelle soit par une valve proportionnelle à commande électrique.

Leur influence se fait sentir surtout au niveau du temps de cycle et du temps de séjour de la matière dans le fourreau.

D - Les temps

1) Temps d'injection

Ce temps est défini comme étant la durée de la phase de remplissage. Il débute habituellement au contact de la buse avec le moule et se termine avec la commutation de la pression d'injection à la pression de maintien. Donc le point de commutation détermine le temps d'injection.

Ce point de commutation peut être contrôlé par:

- un temps fixé par une minuterie
- une position de la vis
- une pression hydraulique du vérin d'injection
- une pression de la matière dans le moule.

Si le temps d'injection est trop court, on finit de remplir le moule avec la pression de maintien qui est généralement plus faible que la pression d'injection ce qui diminue la densité de la pièce, l'anisotropie du retrait et l'orientation.

Si le temps d'injection est trop long, on commence à bourrer la pièce avec une pression trop grande produisant une augmentation de la densité de la pièce pouvant mener à une fragilisation de celle-ci.

2) Temps de maintien

C'est le temps que dure la phase de bourrage et ce temps est contrôlé par minuterie. Cette minuterie est déclenchée par la commutation de la pression d'injection à la pression de maintien.

Une augmentation du temps de maintien:

- augmente - l'orientation moléculaire
  - la densité de la pièce

- diminue le retrait.

Notons que les observations relevées ici ne sont valables que pour des temps de maintien inférieurs au temps de figeage du seuil d'alimentation car une fois celui-ci solidifié, il ne sert à rien de maintenir la pression.

3) Temps de refroidissement

Le temps de refroidissement s'échelonne de la fin du temps de maintien jusqu'à l'ouverture du moule. C'est une minuterie qui règle ce temps.

Le temps de refroidissement est fonction de la température du polymère fondu, de l'épaisseur de la pièce, de la nature du polymère et de la température du moule. Le temps de refroidissement a une incidence directe sur le temps de cycle et donc sur le prix de revient de la pièce.

Si le temps de refroidissement est trop court, on peut avoir des déformations de pièces lors de l'éjection et un rejet de celles-ci.

4) Temps entre cycle

C'est le temps entre la fin du cycle (ouverture du moule) et le début du cycle suivant. Sa durée est commandée par une minuterie en cycle automatique ou par le temps que l'opérateur de la presse met à enlever la pièce du noyau du moule en cycle semi-automatique. Ce temps influence le séjour de la matière dans le fourreau et par conséquent sa température.

E - Les positions

Les positions sont lues par des capteurs de déplacement. Sur les presses de l'ancienne génération, les positions ne sont pas mesurées par des capteurs mais elles sont réglables par des limiteurs de course.

1) Position arrière de la vis ou lock de dosage

Cette position est très importante car elle règle la quantité de matière accumulée devant la vis. Lorsque la vis atteint cette position, il y a arrêt de la rotation de la vis.

Si le déplacement de la vis est trop faible, il n'y a pas remplissage du moule et les pièces sont incomplètes.

Si le déplacement est trop grand, il y aura une augmentation des pertes de charge entre le piston du vérin d'injection et le moule d'où une diminution de la pression dans le moule. Ordinairement, on conserve une faible quantité de matière dans le fourreau après injection qu'on appelle "matelas de matière".

Celui-ci évite le problème des pièces incomplètes causé par les variations de certains paramètres et empêche également que le bout de la vis vienne buter contre le fourreau.

2) Position de commutation

Cette position réglable de la vis de plastification détermine le temps d'injection. Par conséquent les effets de cette position sur la pièce injectée sont les mêmes que ceux du temps d'injection.

3) Position de recul du ponton

Cette position ajustable a pour but de limiter les échanges thermiques entre le moule et la buse durant le refroidissement de la pièce. On utilise

ce réglage surtout lorsqu'on travaille en moule froid. Habituellement la valeur de recul est faible car l'avance du ponton intervient dans le temps de cycle global.

4) Position avant et arrière de l'ouverture du moule

La position avant réglable par limiteur de course intervient uniquement lors d'un changement de moule. La position arrière réglable de la même façon intervient dans le temps de cycle; elle doit être réglée pour permettre l'éjection de la pièce et minimiser les temps d'ouverture et de fermeture du moule.

F - Conclusion

Il faut bien se rendre compte que les différents paramètres d'injection présentent des interdépendances difficilement quantifiables. Exemple:

L'augmentation significative de la température provoque une diminution de la viscosité de la matière. Si la vitesse d'injection est contrôlée par une restriction, on aura une vitesse plus grande. Une diminution de la viscosité de la matière suppose également une diminution des pertes de charge entre le vérin d'injection et le moule et même à l'intérieur du moule. Ce qui se traduit par un compactage de la matière plus efficace pour une pression constante.

D'un autre côté une augmentation de la température de la matière signifie une augmentation du volume spécifique à pression constante (voir diagramme P-V-T, Fig.11) et donc un effet contraire au compactage de la matière. De plus, il faudra sans doute apporter une augmentation du temps de maintien ou du temps de refroidissement. C'est pourquoi dans ce domaine, une bonne expérience est utile afin d'appréhender les phénomènes.

Pour le réglage des paramètres d'injection d'un nouveau moule, le régleur possède déjà des renseignements sur le polymère et peut au départ obtenir une plastification satisfaisante. Il règle généralement sa presse à des conditions qu'il a déjà repérées et les premières pièces qu'il injecte, lui indiquent les modifications qu'il doit apporter. Par exemple:

- Un gauchissement de la pièce révèle une anisotropie importante du retrait et un problème au niveau de la température du moule, du temps de refroidissement ou de la conception du moule.
- La présence de bulles correspond à un manque de pression dans l'empreinte qu'il peut compenser en augmentant soit la température du moule, soit la pression ou la vitesse.

- Les trous ou les rides superficielles sont le résultat d'un mauvais remplissage, il lui faut alors élever la température de la matière, la vitesse d'injection ou la température du moule.
- Les retassures sont un signe de retrait, on ne peut pas toujours les éliminer complètement mais on cherche quand même à les diminuer le plus possible avec de fortes pressions, un moule froid et une température d'injection basse.

Lors de l'élimination de certains défauts cités plus haut, d'autres peuvent apparaître amenant le transformateur à modifier le moule afin d'obtenir une plage de réglage qui donne de bonnes pièces. Il essaie alors de minimiser les temps de cycle pour obtenir un prix de revient avantageux.

DEFAUTS DES PIECES MOULEES EN FONCTION DES CONDITIONS DE MOULAGE

CAUSES / DEFAUTS	PRESSION INJECTION	TEMPS INJECTION	VITESSE INJECTION	PRESSION MAINTIEN	TEMPS MAINTIEN	TEMPS REFROIDISSEMENT	PRESSION FERMETURE	VITESSE ROTATION VIS	CONTRE PRESSION	DOSAGE	TEMPERATURE	
											FOURREAU	MOULE
PIECE INCOMPLETE	faible	court	faible	faible	court					faible	faible	faible
BAVURES	forte	long	élevée	forte	long		faible					
RETASSURES ET VIDES	faible	court	faible	faible	court					faible	élevée faible	élevée faible
SOUDURES	faible		faible	faible							faible	faible
PIECE CASSANTE	faible	court	faible	faible				élevée			faible	faible
DECOLORATION	forte	long	élevée	forte	long		forte	élevée	forte		élevée	
DEFAUTS DE SURFACE	faible	court	élevée	faible	court			élevée	forte		élevée faible	faible
DISTORSION	faible	court	faible	faible	court						élevée	élevée
FORT RETRAIT	faible	court	faible	faible	court						faible	faible
DIMENSIONS	faible	court long	élevée					inégale	inégale		faible	inégale
COLLAGE	forte	long		forte	long	court				fort		élevée
STRIURES ET RIDES		court	faible							faible	élevée	

Figure 12

Défauts des pièces causés par les conditions de mise en oeuvre

CAUSES / DÉFAUTS	MACHINE					MOULE									MATIÈRE
	SYSTÈME PLASTIFICATION	CLAPET ANTI-RETOUR	OUVERTURE BUSE	FERMETURE	PLATEAUX	CANAUX ALIMENTATION	SEUIL D'ALIMENTATION			EVENT			REMPLISSAGE DES EMPREINTES		
							NOMBRE	DIMENSION	POSITION	NOMBRE	DIMENSION	POSITION			
PIÈCE INCOMPLÈTE	faible	mauvais	faible		non parallèles	faibles	faible	faibles	mauvaise	faible			interrompu inégal		
BAVURES				faible						faible	forte		interrompu inégal		
RETASSURES ET VIDES	faible		faible			faibles		faibles	dans sections minces	faible			interrompu inégal		humide lubrifiée prd. volatile
SOUDURES	faible		faible			faibles		faibles	loin de la soudure	faible		loin de la soudure	interrompu inégal		contaminée température inégale
PIÈCE CASSANTE	faible					faibles		faibles							contaminée humide prd. volatile
DÉCOLORATION	encrassé					faibles		faibles		faible					contaminée dégradée
DÉFAUTS DE SURFACE						faibles		faibles	mauvaise	faible					humide contaminée dégradée
DISTORSION							faible	faibles	mauvaise	faible					
FORT RETRAIT							faible	faibles	mauvaise	faible					
DIMENSIONS	mauvais	mauvais				faibles ou fortes		faibles ou fortes							humide lot de matière
COLLAGE					non parallèles		faible	fortes	mauvaise				interrompu inégal		contaminée humide non lubrifiée
STRIURES ET RIDES									mauvaise						humide

Figure 13

Défauts des pièces causés par les outils de transformation

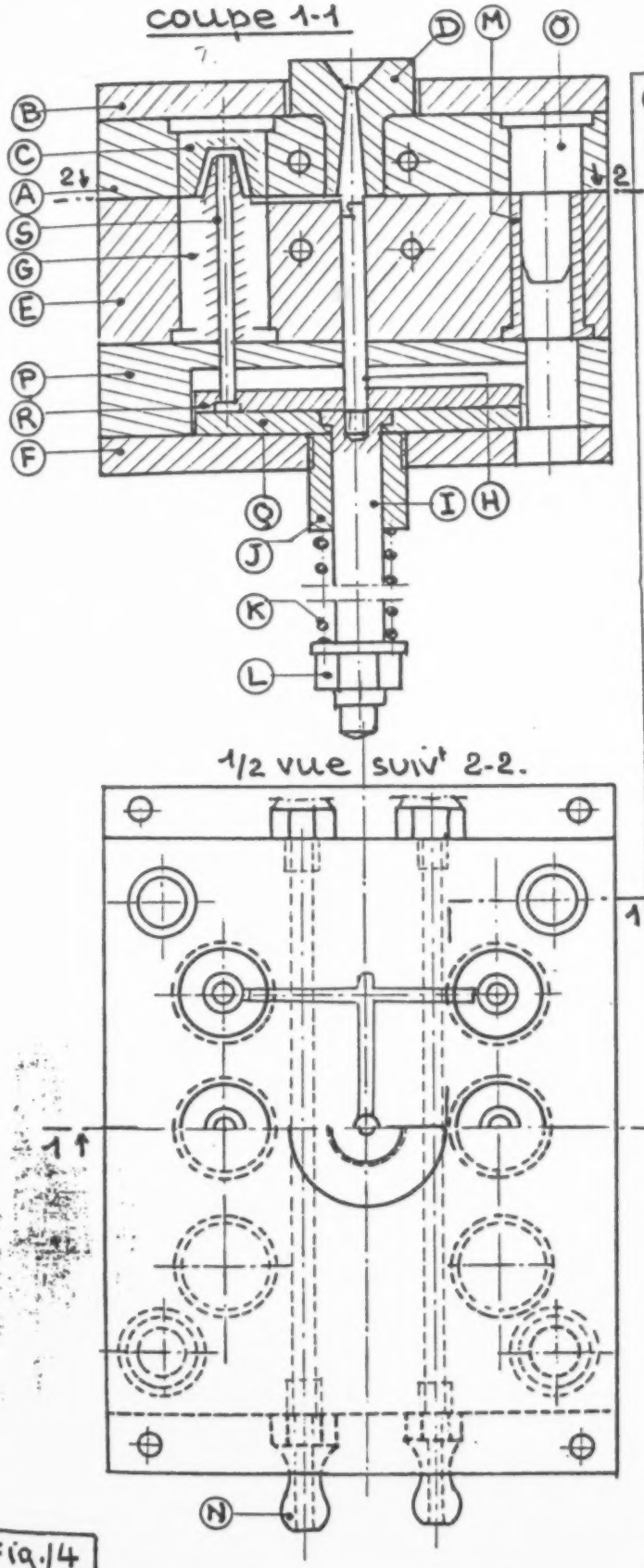
IV. LES MOULES

Définition des différentes parties des moules

Les différents systèmes d'injection

Un moule à caunaux chaud typique

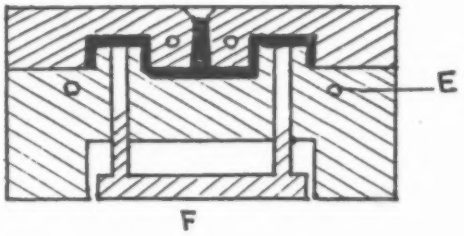
Moule plus complexe avec des tiroirs



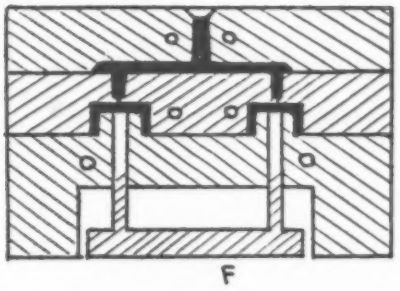
A	Plaque porte poinçon
B	Plaque de fixation supre.
C	Empreinte
D	Buse
E	Plaque porte empreintes
F	Plaque de fixation infre.
G	Poinçon ou piston.
H	Ejecteur de carotte
I	Tige d'éjection.
J	Douille de guidage.
K	Ressort de rappel.
L	Ecrou d'arrêt.
M	Bague de guidage.
N	Raccords
O	Goujons de guidage
P	Plaque intermédiaire.
Q	Plaque d'éjection
R	Contre-plaque d'éjection
S	Ejecteurs.

Fig.14

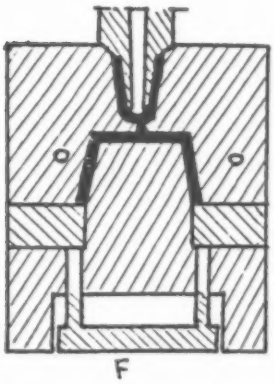
a. Injection normale



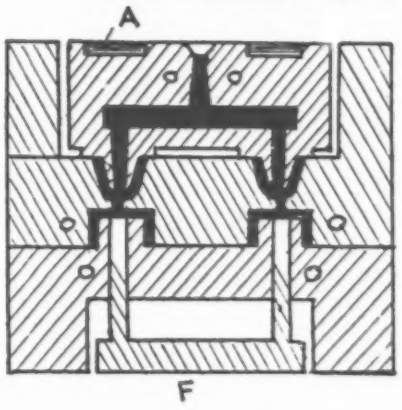
b. Injection capillaire



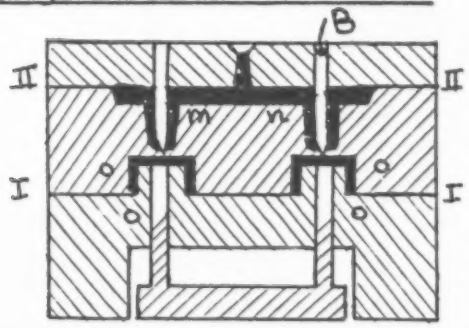
c. Injection à carotte chaude



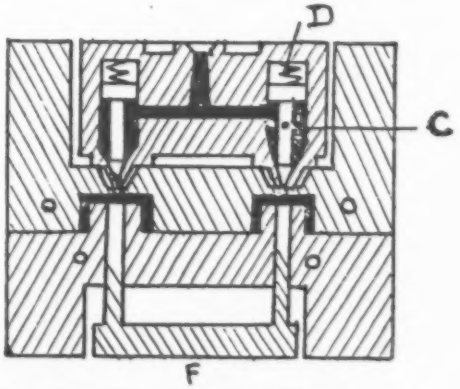
d. Injection à canaux chauds



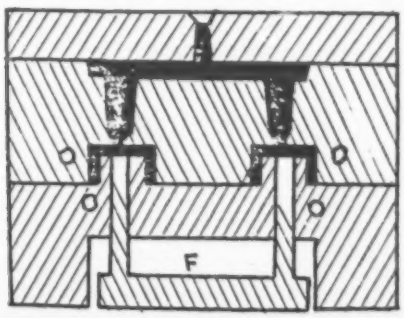
f. Injection canadienne



e. Injection à canaux chauds et précompression



g. Injection à canaux froids



A: Résistances électriques.
B: Cartouche électrique chauffante
C: pointeau obturateur
D: ressort.
E: Canal de refroidissement.
F: Dispositif d'éjection.

Fig:15

MOULES D'INJECTION POUR THERMOPLASTIQUES

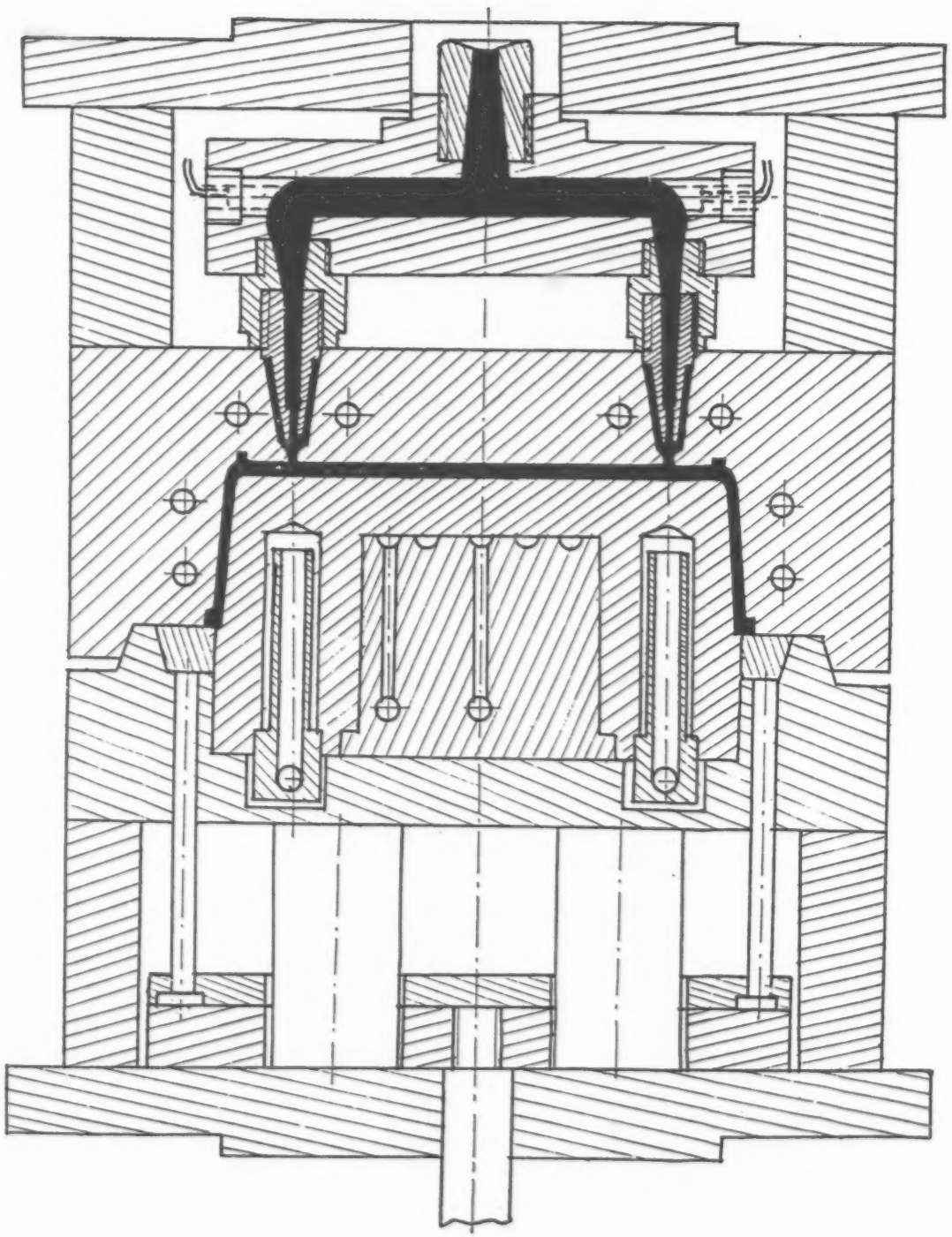
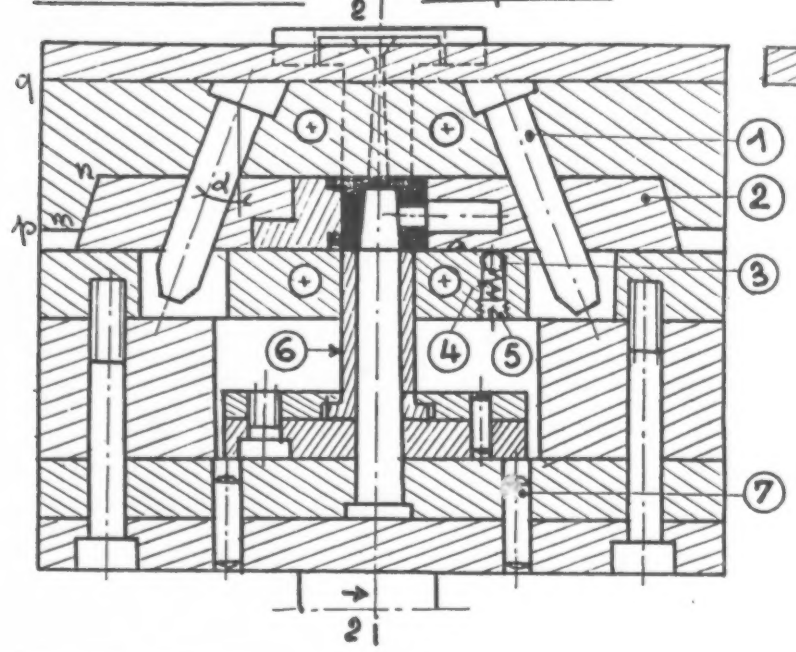


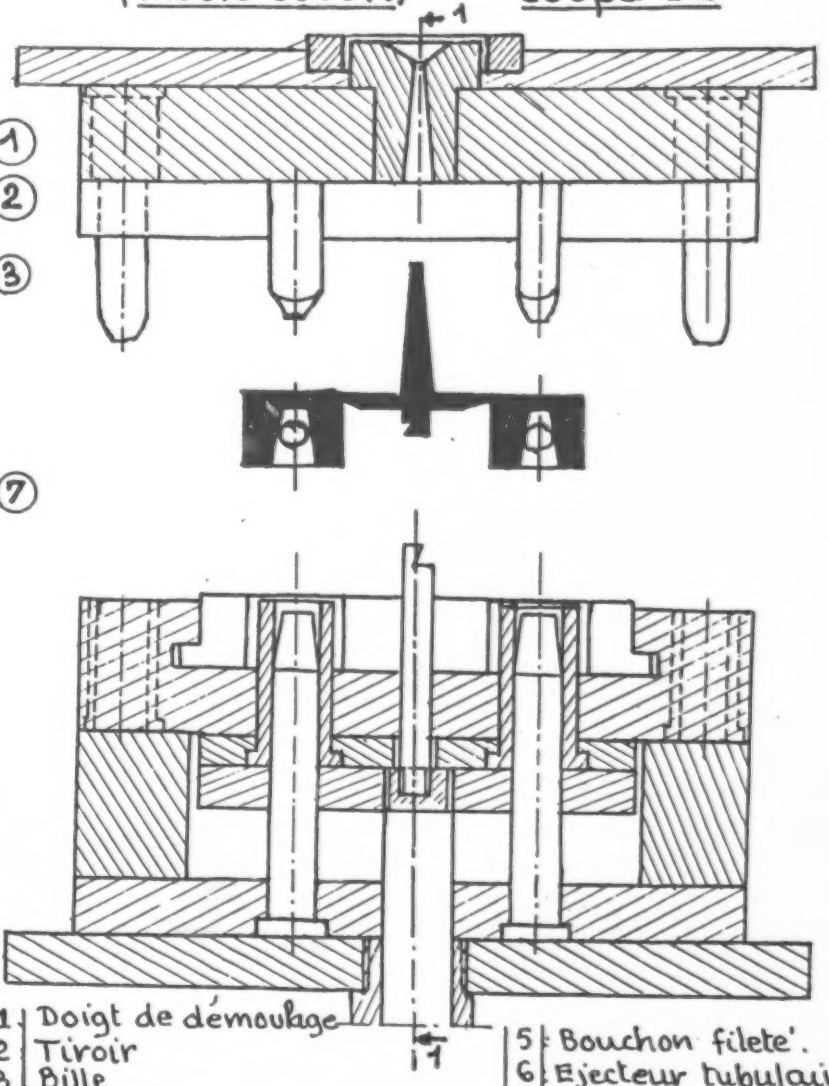
Fig. 16

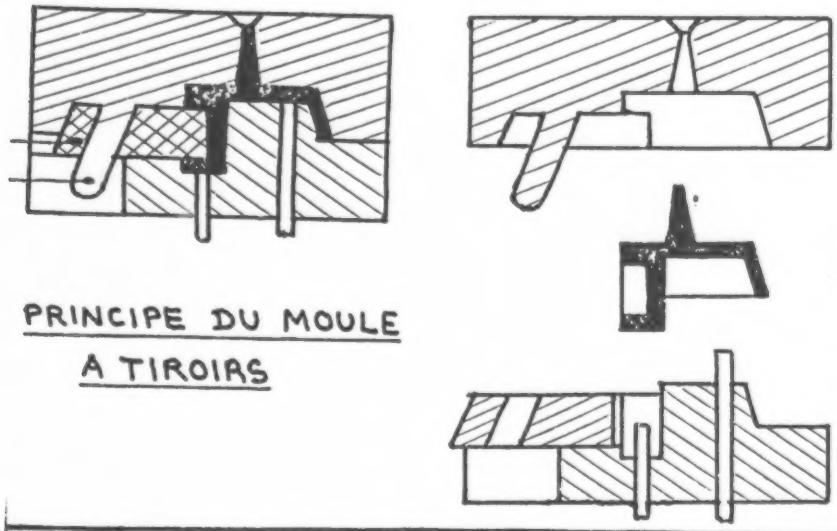
MOULES D'INJECTION: à canaux chauffants.
chauffage par résistances.

(Moule fermé) coupe 1-1



(moule ouvert) coupe 2-2





PRINCIPE DU MOULE A TIROIRS

1	Doigt de démoulage
2	Tiroir
3	Bille
4	Ressort
5	Bouchon fileté.
6	Ejecteur tubulaire
7	Goupille de centrage.

MOULE A TIROIRS POUR INJECTION DES THERMOPLASTIQUES

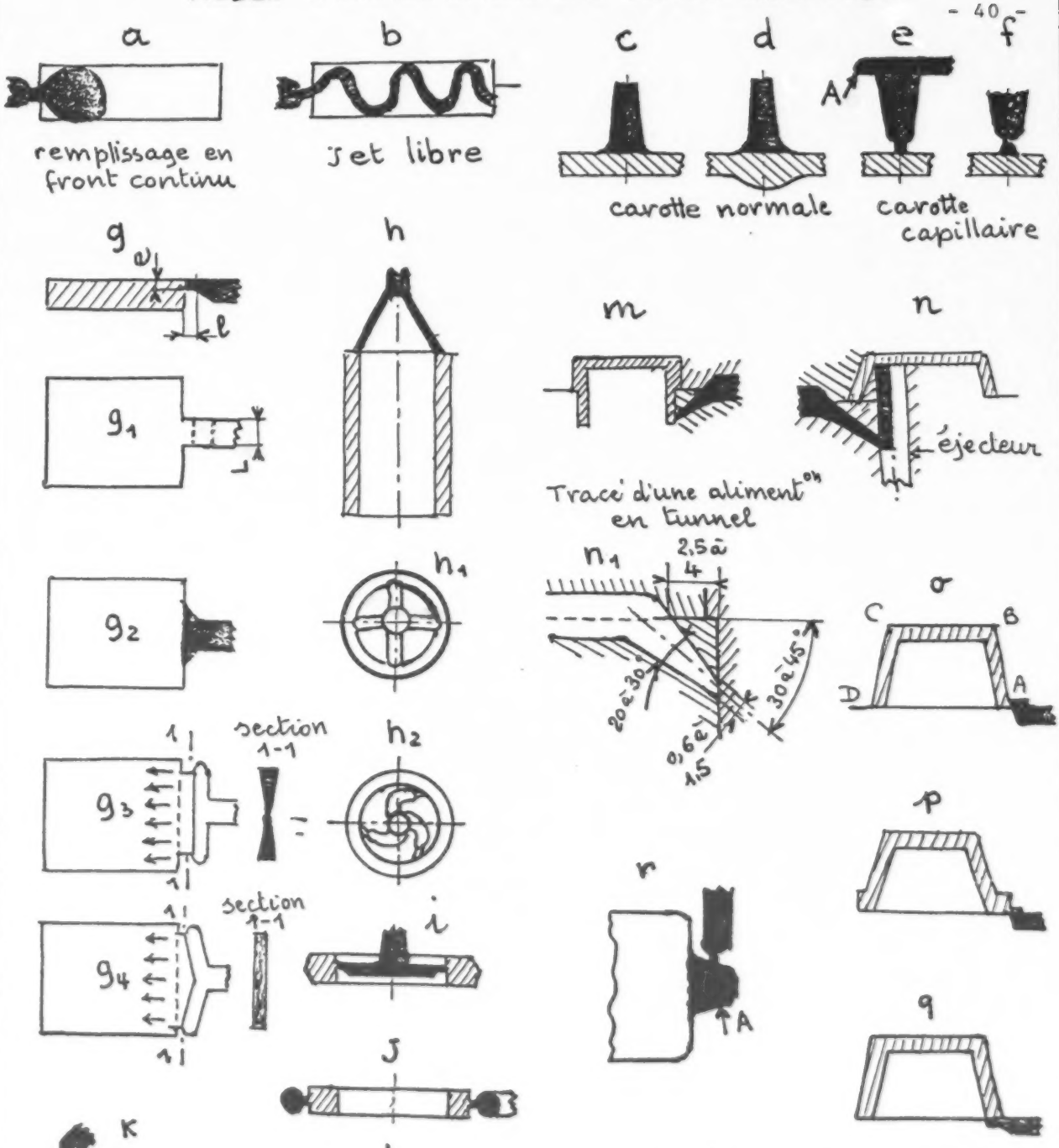
Fig. 17

V. CONCEPTION DES PIECES

Les seuils d'injection

Exemples de conception

MODES D'ALIMENTATION DES PIECES INSECTEES



g-g_1 : alimentation latérale de largeur égale à celle du canal.
g-g_2 : alimentation en éventail.
g_3 et g_4 : alimentation en voile.
h : alimentation en parapluie.
i : alimentation par disque.
j : alimentation par diaphragme.
k : alimentation latérale oblique
l : alimentation annulaire.
m, n : alimentation en tunnel.

o, p : alimentation latérale.
q : alimentation par la base.
r : alimentation en chicane.

Fig. 18

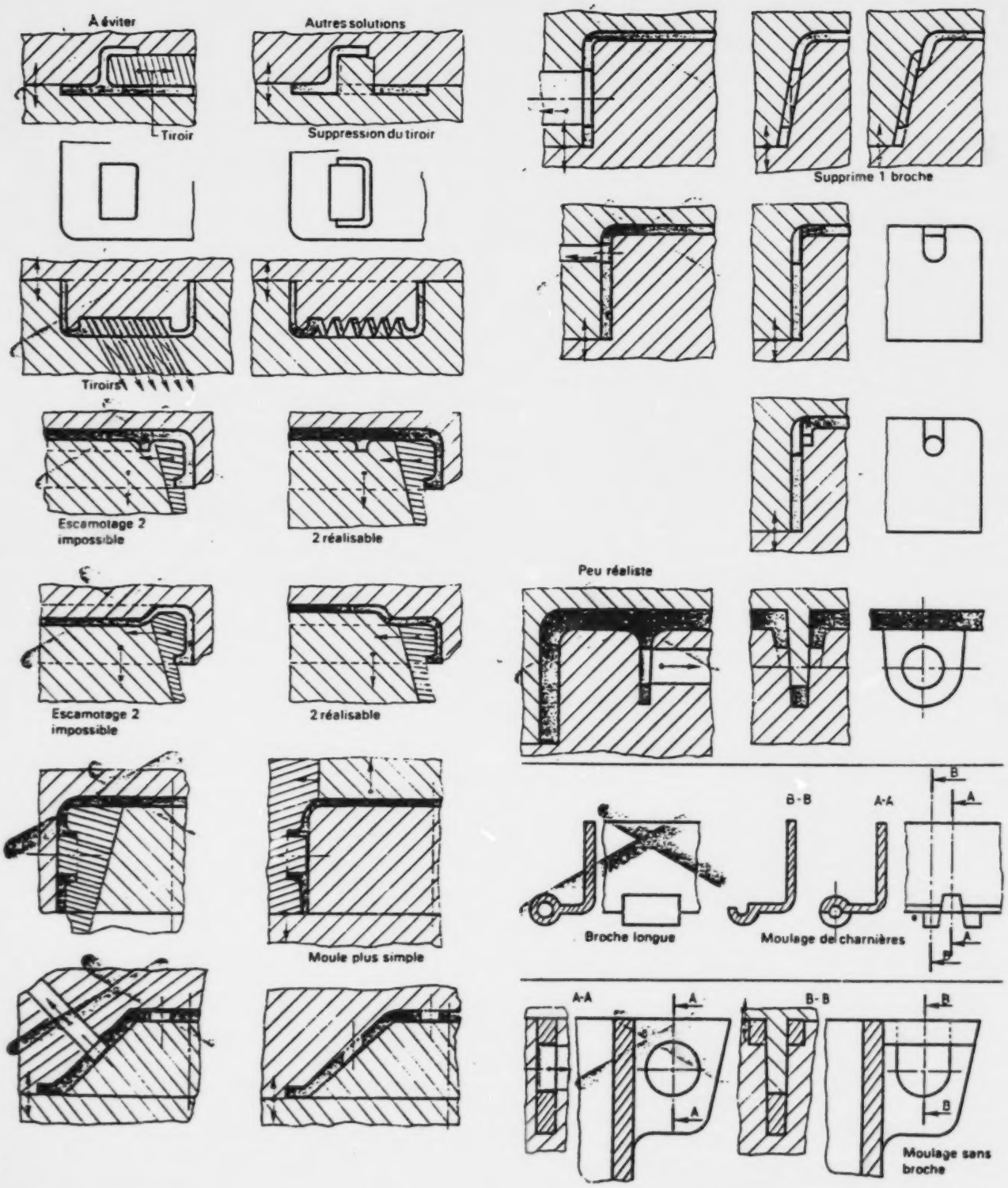


Fig. 19 Simplifications de moules

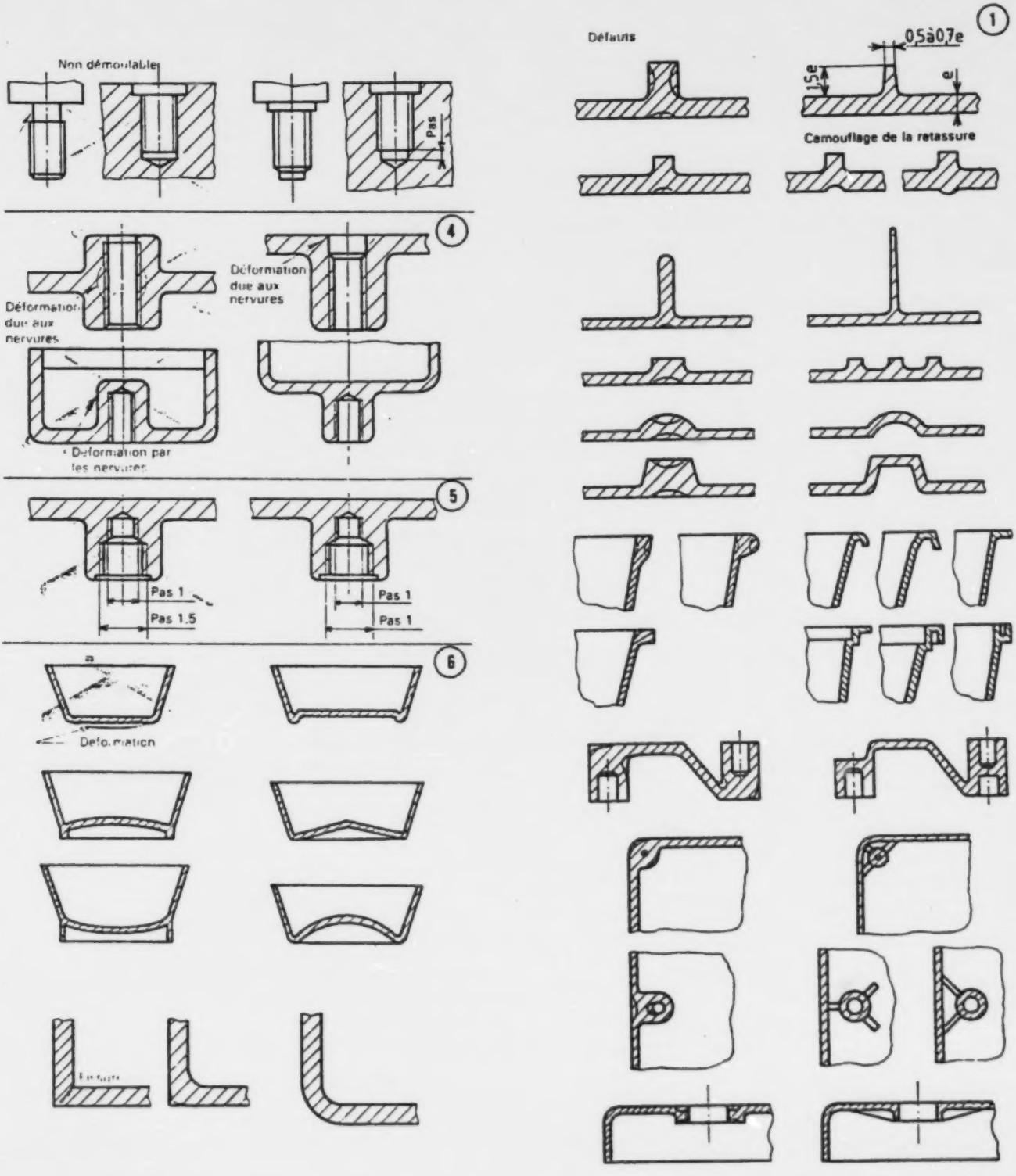


Fig. 20 Nervures et taraudages

VI. CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE POUR DIFFERENTS POLYMERES

Matières	Température Matière °C	Température Moule °C	Pression d'Injection PI en bars	Presion de Maintien en bars	Vitesse d'Injection	Temps de Maintien	Contre Pression en bars	Dispositions supplé-mentaires
PEbd	160/260	20/70	500/1000	Minimum sans retassures		Faible		
PEhd	260/310	50/70	600/P. Maxi	30 à 100 % de P. Maxi				
PP	230/270	40/100	600/P. Maxi	50 à 100 % de PI				
PS PS choc	180/230 < 250	20/60 Si possible : 45/60	1000/P. Maxi		Maximale			Parfois étuvage
SAN	220/260	50/70	1000/P. Maxi		Élevée			Étuvage
ABS	220/280	60/80	800/1400					Étuvage
PA 6/6	250/290	80/90	700/1200	40 à 100 % de PI	Élevée			Étuvage
PA6	240/290	80/90	800/1300	20 à 60 % de PI	Élevée			Étuvage
PA11	230/300	30/90	400/700		Moyenne			Étuvage
POM	180/220 < 230	50/120	800/2000	PI	Élevée	20 % du cycle minimum		Parfois étuvage
PC	270/320	80/120	800/2000	70 % de PI	Élevée	Minimum	Faible	Étuvage
PETP	260/270 < 300	140	1200/1700		Élevée			Étuvage
PETP amorphe	270/290	40/50	1200/1700		Élevée			Étuvage
PBTP	260/270	70/80	1000/2000	60 à 100 % de PI	Élevée		10 à 20 % PI	Étuvage
PPO	260/300	80/110	1000/2000	60 à 80 % de PI	Élevée		Faible	Étuvage
PVC	170/190	50/60	1200/1400	50 à 80 % de PI	Faible à Moyenne		jusque 150	Éjection de la goutte froide
PMMA	200/250	40/90	500/2000	Décroissante		Minimum	100/200	Étuvage
PA 6/6 + Fibres verre	260/290	90/120	900/1500	40 à 100 % de PI	Élevée			Étuvage
PA 6 + Fibres verre	240/290	90/120	1000/1500	20 à 60 % de PI	Élevée			Étuvage
PC + Fibres verre	300/325	90/110	1000/2000	70 % de PI	Élevée	Minimum	Faible	Étuvage

Fig. 21 Conditions de mise en oeuvre

Matière	Pression d'injection bars	Temper. d'injection	Temp^re du moule
PS stand	750-1250	200-250°	50-80°
choc	600-1000	150-320	60-70
chaleur		190-320°	80-90
allégé	faible	170-250	
SAN	800-1200	190-320	40-88
ABS	700-1400	220-275	60-90
choc élevé		220-275	
choc		245-275	
chaleur	1000-1900	245-290	
galvanop.		245-290	
MBS	élevée	200-240	70
PE bd[x]	550-1050	150-260	40-60
réticulé	800-1200	105-120	190-200°
PE hd	600-1500	160-260 peu fluide	60-80 bril.
		200-300° fluide	50-60°: normal
PPh	550-1000	200-300°	20-80° suivant, fluidité
ép^r < 2 mm		250-300	
4 - > 6 mm		230-270°	
		200-230°	
PPc	< 1250	177-230	10-66
PP fv		240	50-90
talc		230	20-80
amiante		< 250	40-60
PVC plast.	550-1750		60-90
45%		150	
40		160	
35		170	
30		175	
25		180	
20		185	
PVC rigide	1200-1300	170-190	70
Acetochlorure	500	125-165	30-50
Alcool-polyv.	300-800	95-145	20-40
PVDC	700-2100	125-205	100°: cristal froid: amor.
CA[xx]	800-1500	170-250	50-60
CAB	600-2000	175-265	65-80
EC	500-2000	175-250	40-65
CP	600-2000	170-270	40-50
PMMA mou	800-1400	160-200	50
mi-dur	900-1800	190-215	55-70
dur	1800-2100	220-250	100-120
PEC	700-1400	218-240	> 25°: cristal

Matière	Pression d'injection bars	Temp^re d'injection	Temp^re du moule
PA 66	550-1000	270-300	
PA 66 fv	500 fib. court	275-305	70°
	300 fib. long		80-90
PA 6:	700-1250	230-290	80-90
fluid. moy		240-250	
peu fluid.		250-270	
fluide		230-240	
PA 6 fv		275-305	30-60 ou 80-120
PA 11	600-1200	210-270	40
PA 11 fv		230-290	
POM h	700-1400	180-230	60-90 ou plus
POM c	800-1700	180-230	60-90 ou 130-140: inter.
POM c fv.		190-210	80-120
PC	800-1400	270-320	85-120
PC fv		300-330	120
PPO m	850-1400	245-300	80-110
PPO m fv	1050-1400	275-315	85-120
PBTP		225-265°	30-80
PETP	1000-1200	260-280	{130°: cristal.
PETP fv	1000-1300	275-285	{< 50°: amor.
PCTFE[xxx]			
bas pds mol	1400-2800	225-260	150
moy. - -	1400-2800	230-275	
haut - -	1400-4200	250-290	
FEP		345-400	100-250
PFA		310-350	100-150
ETFE	140-1400	275-345	20-175 95 en gén[al]
PSU		355-400	100: pièce simple
PVDF		200-260	
PASU	1400-2100	370-400	230-260°
PPS		340-370	25-200
PPS fv	850-1350	300-350	25-40 (choc)
PUR élast.	400-1000	190-240	épaisses 0-5° pièces
PS butad. élastom.		160-220	

[xxx] PCTFE : temp^re ing^on 14° en moins si plastifié

[xx] CA : moule: 70°: pièces massives
50-60°: bel aspect
30°: pièces opaques

[x] PEbd : moule 20-30°: grades élevés
60-70 - faibles

[xx] CA : pression: 800-900 bars: normal
1200-1300 - écoulement long
2000 - injection capillaire

Fig. 22

BIBLIOGRAPHIE

M. Mourque, "Technologie du moulage par injection des thermoplastiques" 1ère et 2ième parties, Imprimerie Bosc Frères, 69002 Lyon, 1980.

J.P. Trotignon, M. Piperaud, J. Verdu, A. Dobraczynski, "Précis de matières plastiques", Ed. Fernand Nathan, Paris, 1982.

J.L. Throne, "Plastics Process Engineering", M. Dekker Inc., New York, 1979.

S.S. Schwartz and S.H. Goodman, "Plastics Materials and Processes", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982.

MOULAGE PAR SOUFFLAGE

ANDRES GARCIA-REJON

PDP-'87

23-24 SEPTEMBRE 1987.

MOULAGE PAR SOUFFLAGE

1. INTRODUCTION _____ 1

2. TECHNIQUES DE SOUFFLAGE _____ 2

EXTRUSION - SOUFFLAGE _____ 2
INJECTION _ SOUFFLAGE _____ 7
ETIRAGE ET SOUFFLAGE _____ 9
COEXTRUSION - SOUFFLAGE _____ 11

3. DIVERS SYSTEMES D'EXTRUSION-SOUFFLAGE _____ 13

4. CONTROLE DU PROCEDE D'EXTRUSION-SOUFFLAGE _____ 17

5. LES MATERIAUX UTILISES DANS L'EXTRUSION-SOUFFLAGE ___ 32

6. BILAN TECHNIQUE DU PROCEDE DE SOUFFLAGE _____ 38

DESCRIPTION GENERALE DU PROCEDE DE SOUFFLAGE

HISTORIQUE:

L'idée du moulage d'un corps creux par le soufflage d'un tube de plastique chauffé, remonte à la fin du XIX siècle. C'est en 1881, que les firmes Américaines: Novelty Co. et Celluloid Manufacturing Co, déposèrent une demande de brevet pour le procédé connu aujourd'hui sous le nom d'extrusion soufflage.

Les premiers essais techniques ne furent cependant réalisés qu'en 1937 avec des matériaux tels que l'acétate et le polystyrène.

Le principe de base du procédé de soufflage est de produire une forme "tubulaire" qui est insérée dans un moule qui en pince les extrémités. Ce tube de plastique chaud, est ensuite gonflé par un jet d'air sous pression qui le force a épouser les contours intérieurs du moule.

Ce procédé de fabrication qui permet de produire des corps creux, est largement répandu dans le domaine des emballages, où il sert à produire des contenants, dont les dimensions vont de quelques onces à plus de 45 gallons.

Les techniques de soufflage se partagent en deux grandes familles:

- EXTRUSION SOUFFLAGE
- INJECTION SOUFFLAGE

Ces deux méthodes offrent à leur tour des variantes telles que la BI-ORIENTATION et le soufflage des MULTI-COUCHES (coextrusion).

De toutes ces techniques, l'extrusion soufflage est la plus anciennes et elle demeure la plus largement utilisée. C'est d'ailleurs elle qui fait l'objet de ce dossier.

LA TECHNIQUE D'EXTRUSION SOUFFLAGE

Cette technique de moulage des corps creux débute avec l'extrusion d'un tube de plastique chaud, appelé PARAISON. La paraison est ensuite placée au centre du moule ouvert, qui se referme en pinçant les extrémités du tube.

Une buse ou une aiguille de soufflage pénètre dans la paraison et y injecte de l'air comprimé. La pression gonfle la paraison chaude comme s'il s'agissait d'un ballon et lui fait épouser la forme intérieur du moule.

Au contact de la paroi froide du moule, le plastique se fige rapidement et la pièce durcie peut en être extraite.

En résumé, la séquence de moulage comprend les phases suivantes:

- Plastification de la matière dans l'extrudeuse;

- Extrusion de la paraison par la filière de l'extrudeuse. La taille et l'épaisseur de cette paraison étant adaptées à la pièce à produire;

- Insertion de la paraison au creux du moule, soit par extrusion directe ou au moyen d'un mécanisme de transfert qui saisit la paraison et la place dans un moule;

- Insertion de la buse de soufflage et injection de l'air à environ 100 psi;

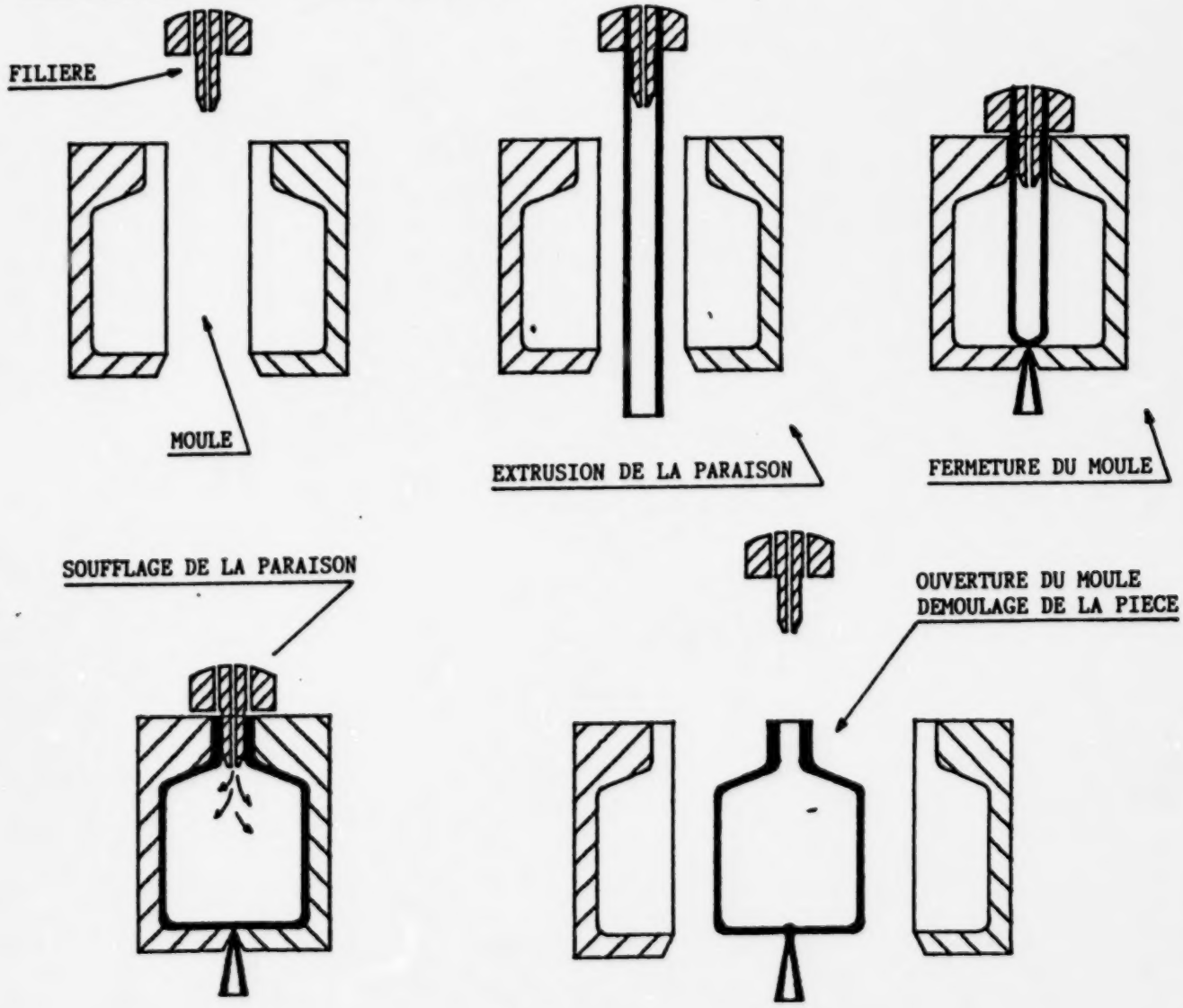
- Refroidissement de la pièce, ouverture du moule et éjection du produit fini.

Selon la taille et le type de pièces à produire, il existe deux grandes catégories de machines à extrusion soufflage, qui se définissent ainsi:

- Système d'extrusion soufflage en CONTINU;

- Système d'extrusion soufflage INTERMITTENT.

SCHEMA DU PROCEDE D'EXTRUSION SOUFFLAGE



EQUIPEMENTS DE MOULAGE

Qu'il s'agisse de la version extrusion soufflage en continu ou intermittent, les équipements comprennent les deux éléments suivants:

- L'unité de plastification et d'extrusion
- L'unité de moulage et de soufflage

UNITE DE PLASTIFICATION ET EXTRUSION

Sa fonction est de recevoir la matière plastique, de la plastifié et de l'extruder au travers la filière afin de produire une paraison.

Pour l'extrusion soufflage en continu, l'unité de plastification est similaire à celle utilisée en extrusion conventionnelle et la paraison est continuellement extrudée.

Dans l'extrusion soufflage intermittent, la paraison n'est extrudée qu'au moment ou elle doit être placée dans le moule. A cause de ce mode discontinu, les unités d'extrusion utilisées pour ce type de moulage sont souvent semblables à celles employées en injection thermoplastique.

UNITE DE MOULAGE ET SOUFFLAGE

Le rôle de cette unité est de porter le moule et d'assurer la saisie de la paraison, le soufflage et l'éjection de la pièce moulée.

Certaines presses ne portent qu'un seul moule, alors que d'autres peuvent en avoir plusieurs, montés sur des carrousels ou des navettes.

Dans l'extrusion en continu, la presse doit être conçue de façon à dégager la paraison entre chaque cycle, tandis que dans le soufflage intermittent, il est possible de laisser le moule stationnaire sous la tête d'extrusion.

MOULES POUR EXTRUSION SOUFFLAGE:

Les moules de soufflage sont souvent usinés ou coulés en aluminium, ou dans des alliages de cuivre. Le critère étant que la matière dont est fait le moule, ait un bonne conductibilité thermique de manière à réduire le temps de refroidissement du plastique moulé.

PINCEMENT (PINCH OFF):

La bordure de la cavité qui doit écraser la paraison et la souder pour faire l'étanchéité, est appelée "pincement" ou "pinch off". Cette zone doit aussi produire une ligne de découpe facilitant le décarottage de la pièce.

En général, ce pincement fait une bordure d'environ 0.010" de largeur qui se prolonge d'une bande d'appuie, inclinée à 30 degrés. Selon sa configuration, le pinch off influence la qualité et l'étanchéité de la soudure.

Compte tenu des pressions de fermeture et de l'impact causé par les chocs répétés à chaque fermeture du moule, la zone du pincement est souvent faite d'un alliage résistant bien à l'usure.

EVENTS:

Les moules doivent être munis d'évents pour assurer l'évacuation de l'air entre la paraison et la cavité, au moment du soufflage. Ces évents sont souvent situés dans le plan de joint, mais dans certains cas il doivent traverser dans la paroi.

REFROIDISSEMENT:

Un bon refroidissement du moule est essentiel pour assurer des cadences rapides. C'est un réseau de canalisation dans lequel circule un liquide réfrigérant, qui améliore l'échange thermique.

CONTROLE DES EPAISSEURS:

La section de la paraison est circulaire ou ovale, en fonction de la forme de la pièce à mouler.

Au soufflage, la paraison est étirée ce qui cause un amincissement de sa paroi. Le taux d'étirement (blow ratio) est le rapport entre le diamètre du moule et le diamètre de la paraison.

Selon le design du produit à mouler, le taux d'étirement peut varier dans une même pièce, causant une variation d'épaisseur dans la pièce finie.

Pour maintenir une certaine uniformité d'épaisseur, malgré les variations du taux d'étirement, il faut extruder une paraison dont l'épaisseur varie en fonction de l'étirement prévu.

Cet ajustement est fait en utilisant un système de poinçon/filière conique. En modifiant la hauteur du poinçon dans la filière, il est possible de changer l'espace annulaire poinçon/filière. Cette modification étant faite durant l'extrusion de la paraison, il en résulte une variation d'épaisseur.

C'est un programmeur de paraison qui permet d'effectuer ces modifications durant le cycle. La paraison ainsi produite présente des variations d'épaisseur qui compenseront la perte d'épaisseur causée par étirement au gonflage.

Pour certains design la seule programmation longitudinale des épaisseurs n'est pas suffisante, il est nécessaire que la paraison ait des variations circonférentielles de ses épaisseurs. Ce profil est alors obtenu en ovalisant le poinçon. Bien que ce type de système soit généralement fixe, de récents développements permettent de le coupler à un programmateur de paraison.

VARIANTES DU PROCEDE DE SOUFFLAGE

INJECTION SOUFFLAGE

L'injection soufflage est un procédé de moulage adapté à la production en grandes séries, de contenants de petites dimensions et aux formes rigoureusement contrôlées.

Cette technique comprend deux étapes: (1) le moulage d'une ébauche (preform) qui est produite par injection thermoplastique; (2) le soufflage de l'ébauche, qui est insérée dans un moule creux.

Par rapport à l'extrusion soufflage, l'injection soufflage offre les avantages suivants:

- Elimination des lignes de soudure;
- Tolérances précises;
- Formage de détails complexes (goulots);
- Régularité des épaisseurs après soufflage.

Le procédé présente aussi quelques inconvénients:

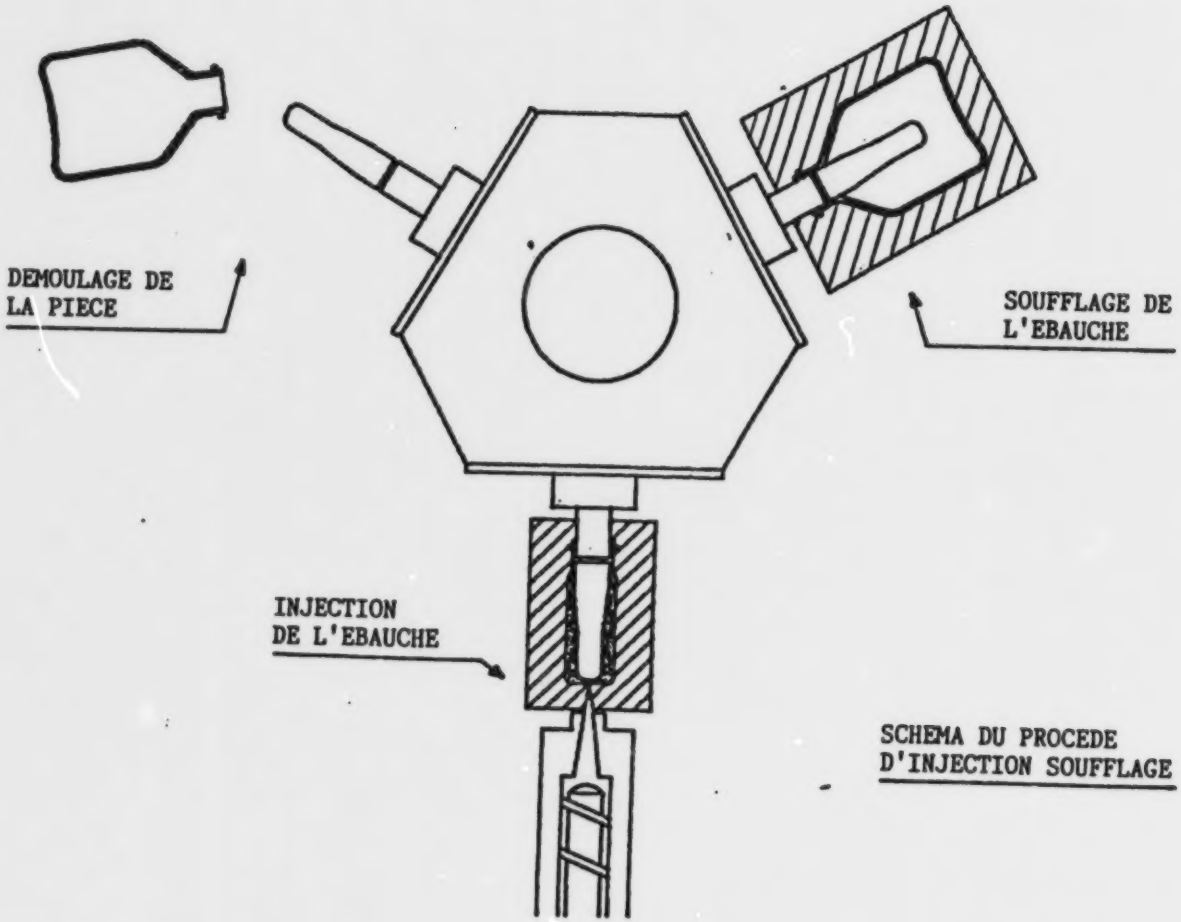
- Restriction dans les formes et dimensions;
- Incapable de mouler des poignées intégrées;
- Coût élevé d'outillage.

Cette technique est surtout répandue pour la fabrication de bouteilles de 16 ozs et moins.

L'injection de l'ébauche, faite en moule fermé, permet d'ajuster les épaisseurs en fonction du taux d'étirement prévu au soufflage. De même, l'injection permet de mouler certaines sections complexes, telles que les goulots sécuritaires.

Ces un procédé efficace et qui entraîne peut de perte de matière due au décarottage.

La majorité des équipements pour l'injection soufflage sont des systèmes multi-stations, comprenant un poste d'injection, un poste de soufflage et un de démoulage.



SCHEMA DU PROCEDE
D'INJECTION SOUFFLAGE

ETIRAGE ET SOUFFLAGE (BI-ORIENTATION):

Cette technique consiste à étirer la paraison ou l'ébauche le long de son axe longitudinal avant qu'elle soit étirée radialement par soufflage. L'orientation bi-axiale qui en résulte, augmente les propriétés structurales, la résistance à l'impact et l'imperméabilité aux gaz; ainsi que la clareté du produit moulé.

Cette méthode est mieux adaptée aux matériaux amorphes et le plastique le plus largement utilisé est le PET, pour la fabrication des bouteilles de boisson gazeuse.

Les températures et taux d'étirement de l'ébauche, varient selon le type de matériel:

TYPE DE MATERIEL	TEMPERATURE DE FUSION	TEMPERATURE D'ETIREMENT	TAUX D'ETIREMENT
PET	280 C	107 C	16/1
PVC	180 C	120 C	7/1
PP	240 C	160 C	6/1

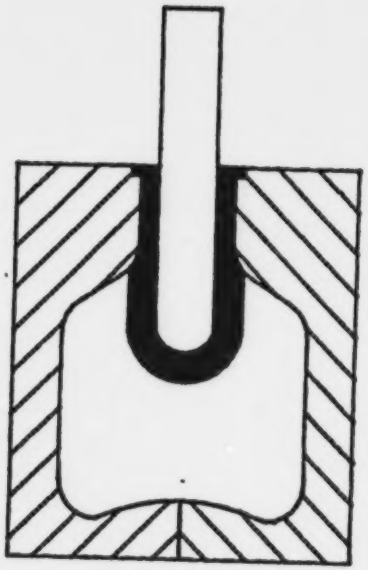
La bi-orientation est adaptée à l'injection soufflage et elle est faite en séquence continue ou discontinue.

Dans la technique en continue, l'ébauche est moulée, étirée et soufflée sur une même machine, conçue pour réaliser toutes ces opérations en séquence. Idéale pour les matériaux sensibles à la dégradation thermique, la méthode est cependant plus délicate et exige des équipements complexes.

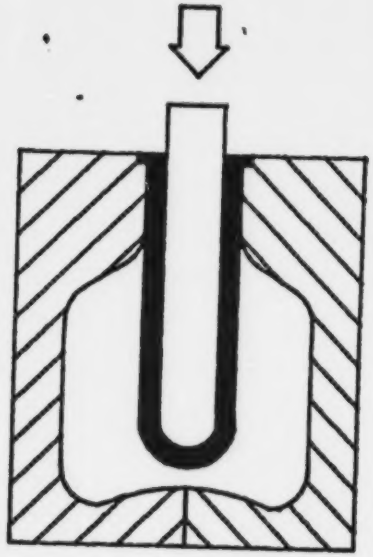
Dans le procédé discontinu, les ébauches sont moulées en avance et laissées à refroidir. L'étirage et le soufflage étant fait plus tard, sur un équipement spécialisé. Cette technique permet d'optimiser les cadences en dissociant les étapes d'injection et de soufflage des ébauches.

Les contraintes de la bi-orientation sont les mêmes que celle de l'injection soufflage et le procédé est surtout adapté aux petits contenants de 2 litres et moins.

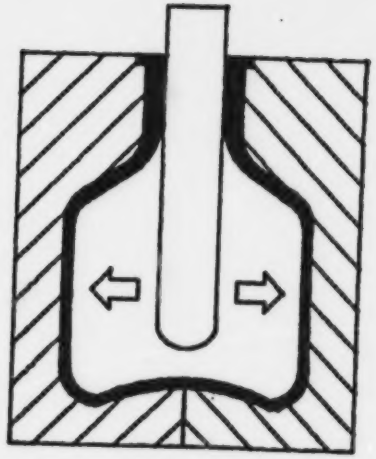
SCHEMA DU PROCEDE DE BI-ORIENTATION SOUFFLAGE



EBAUCHE PLACEE
DANS LE MOULE



ETIRAGE DE
L'EBAUCHE



SOUFFLAGE DE
L'EBAUCHE

COEXTRUSION SOUFFLAGE:

Pour certaines applications telles que des contenants alimentaires, un seul type de plastique ne peut rencontrer toutes les exigences mécaniques et physiques requises. La solution consiste alors à produire une pièce superposant plusieurs couches de plastiques différents, chacun remplissant une fonction spécifique.

Un exemple type prenant avantage de cette technique est celui des contenants alimentaires faits d'une séquence PP/adhésif/EVOH/adhésif/PP. Cette paroi multi couches ayant une bonne imperméabilité aux gaz et permettant un remplissage à chaud tout en étant faite de matériaux relativement économiques.

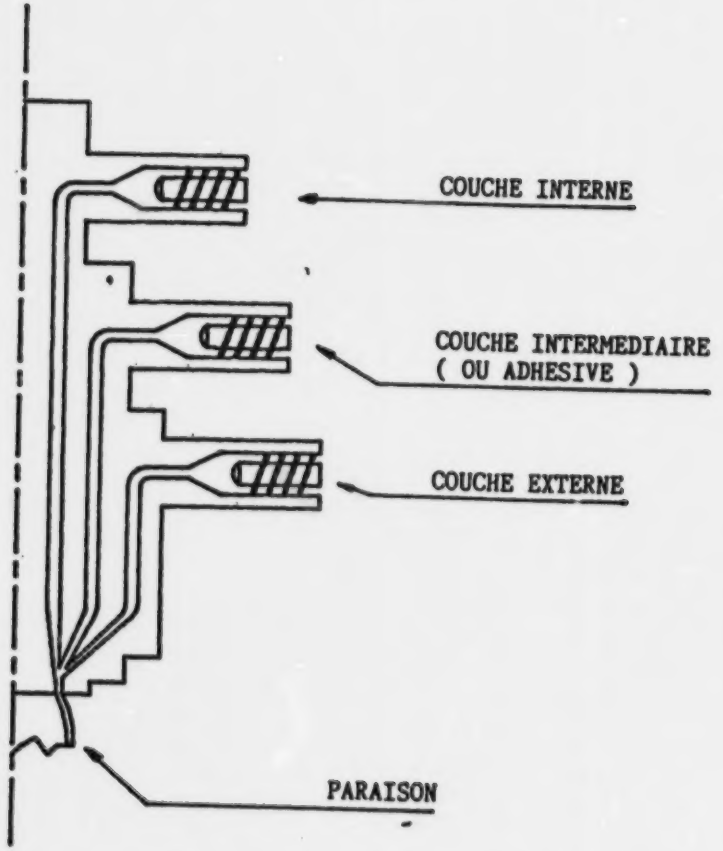
Des séquences HDPE/nylon/HDPE sont aussi employées pour la fabrication de réservoirs industriels, afin de joindre économie, imperméabilité aux gaz et résistance structurale.

Règle générale, la coextrusion comprend 3 à 5 couches distinctes, bien que certains équipements permettent des parois ayant 6 couches. La sixième étant utilisée pour passer la matière regranulée.

L'extrusion multi couches rend difficile la production simultanée de plusieurs paraisons. Il résulte que les presses à carrousel sont mieux adaptées mais il faut compter avec un taux de pertes en regranulage sensiblement plus élevé.

Bien que les systèmes multi couches soient souvent adaptés au procédé d'extrusion soufflage, l'injection soufflage permet aussi de prendre avantage de ce concept.

La technique de co-injection soufflage étant mise au point pour la fabrication de bouteilles d'eau gazeuse moulées en PET. Elle utilise alors un système à trois couches, dans lequel la couche du centre améliore la rétention du gaz carbonique.



SCHEMA D'UN SYSTEME DE CO-EXTRUSION SOUFFLAGE

DIVERS SYSTEMES D'EXTRUSION SOUFFLAGE

TYPES ET CATEGORIES

L'extrusion soufflage est un procédé souvent conçu en fonction d'un produit déterminé. Les fortes cadences imposées pour garder les produits compétitifs ainsi que les contraintes spécifiques aux matériaux, aux applications et aux designs font en sorte qu'il existe une large gamme d'équipements répondant aux exigences du marché.

A la base du procédé d'extrusion soufflage, il y a deux techniques principales:

- L'extrusion soufflage en continu;
- L'extrusion soufflage intermittent.

Un des principaux facteurs régissant l'utilisation de l'une ou l'autre des techniques est la taille de la pièce.

Pour les petites pièces on a souvent recours au soufflage en continu alors que les grandes pièces sont plutôt produites par le procédé d'extrusion soufflage "intermittent".

L'extrusion soufflage en continu est une technique par laquelle la paraison est produite sans arrêt, (en continue), tandis que dans l'extrusion soufflage intermittent, la paraison n'est produite qu'au moment de son insertion au creux du moule.

Au delà des caractéristiques "continu" et "intermittent", les catégories de procédé d'extrusion soufflage comprennent des variantes telles que la multiplicité des moules et/ou des têtes d'extrusion, de même que des caractéristiques particulières au niveau du mode d'extrusion de la paraison.

EXTRUSION SOUFFLAGE "CONTINU":

Dans cette technique, la paraison est extrudée en continue. La séquence de moulage doit donc être balancée de manière à ce que le soufflage et le refroidissement d'une pièce se fassent durant qu'une nouvelle paraison est extrudée.

Ceci exige qu'un mécanisme de transfert saisisse la paraison, la coupe la dégage de la filière et la place dans le moule. En libérant ainsi la filière, l'extrusion peut continuer sans interférence.

Dans certains cas, au lieu d'un mécanisme de transfert, c'est le moule, monté sur une navette ou un carrousel, qui saisi la paraison et la dégage de la filière.

L'extrusion soufflage en continu est adapté aux petites pièces de 1 gallon et moins. Cependant, certains mouleurs arrivent à produire des pièces ayant jusqu'à 2.5 gallons.

La raison empêchant le moulage plus grosses pièces par extrusion soufflage, est le fait qu'un paraison trop gros et trop lourd s'étire sous son poids; ce qui l'amincit près du col de la filière.

L'extrusion soufflage en continu est utilisé pour le moulage de matières sensibles à la dégradation thermique. Cette méthode réduisant au minimum le temps d'attente de la matière dans la tête d'extrusion.

Le soufflage en continu s'adapte bien aux machines portant plusieurs moules. Ceux-ci sont placés, soient en batteries ou sur un carrousel, ce qui augmente la productivité.

Il est aussi fréquent de voir des machines à extrusion continu, produisant simultanément plusieurs paraisons, qui sont traitées par des presses "multi moules".

EXTRUSION SOUFFLAGE "INTERMITTENT":

Cette variante du procédé de soufflage consiste à produire la paraison "sur demande", soit dès que le moule est prêt à la recevoir. Pour y arriver, la résine chaude est accumulée dans une chambre de transfert, d'où elle sera extrudée.

Bien que ce système soit plus délicat à utiliser avec des matières facilement dégradables, il présente deux avantages importants:

- De forts volumes peuvent être extrudés rapidement. De cette façon, la paraison n'a pas le temps d'amincir sous l'effet de son propre poids.

- Il n'est pas nécessaire que la presse soit munie d'un système de transfert dégageant la paraison afin de permettre l'extrusion de la paraison suivante.

Il y a trois systèmes d'extrusion soufflage intermittent, soient:

- SYSTEME PISTON/VIS;
- SYSTEME A CYLINDRE ACCUMULATEUR;
- SYSTEME A TETE ACCUMULATRICE.

Chacun d'eux pouvant extrudé un seul ou une batterie de paraisons, simultanément.

SYSTEME PISTON/VIS:

Le principe piston/vis est similaire à celui utilisé sur les presses à injection. Une vis plastifie la matière et l'accumule à l'avant du fourreau. Au moment de la formation de la paraison, la vis devient un piston et extrude la résine au travers la filière. Ce type d'équipement est utilisé sur des machines relativement petites, soient pour des extrusions n'excédant pas 5 lbs.

SYSTEME CYLINDRE ACCUMULATEUR:

Sur les machines à "cylindre accumulateur", une vis plastifie continuellement la matière qui est accumulée dans un cylindre de transfert. C'est un piston fermant le fond du cylindre qui force la pâte vers la filière, pour former la paraison.

Le défaut de ce système est que la matière plastifiée et accumulée en premier n'est extrudée qu'en dernier (first in / last out). Ce qui cause une "non uniformité" du coulis et un risque de dégradation de la matière.

Les machines du type "cylindre accumulateur" permettent la production de paraisons allant de 5 à 50 lbs par cycle.

SYSTEME A TETE ACCUMULATRICE:

Le troisième concept, soit celui de la tête accumulatrice n'impose pas les défauts du précédent. La chambre de transfert étant conçue de façon à permettre une accumulation du type premier entré / premier sorti. (first in / first out).

La tête accumulatrice emmagasine la pâte sous une configuration sensiblement semblable à la paraison qui sera extrudée. Cette technique nécessite que le centre de la chambre de transfert soit constituée d'un tube forçant le plastique à s'y accumuler tout autour.

Ce système a pour inconvénient de créer une ligne de soudure le long de la parasion. Bien que souvent mineur, le problème peut être plus ou moins contrôlé par le design de la tête accumulatrice. Certains modèles divisant l'entrée de la matière et forçant son réaménagement avec des jointages décalés.

Le principe de la tête accumulatrice est de plus en plus utilisé. Ce type de machine permettant des cycles jusqu'à 300 lbs, avec un minimum de dégradation de la matière.

CONTROLE DU PROCEDE D'EXTRUSION SOUFFLAGE

Comme dans tous les procédés de moulage des plastiques, le moulage par extrusion soufflage nécessite un contrôle rigoureux de plusieurs variables, tant au niveau du conditionnement de la matière que dans sa mise en forme.

Sur la majorité des équipements d'extrusion soufflage, les éléments de contrôle se regroupent dans les catégories suivantes:

- Températures
  - Plastification
  - Coulis
  - Moule
- Pressions
  - Hydraulique (système complet)
  - Extrusion
  - Contre pression sur la vis
  - Pression de soufflage
- Vitesses
  - Rotation de la vis
  - Axial du piston ou de la vis
  - Fermeture et ouverture du moule
- Temps
  - Durée du cycle
  - Refroidissement
  - Programmation de la paraison
- Positions
  - Longueur de la paraison
  - Programmation de la paraison
  - Mouvement du piston ou de la vis
  - Localisation du moule

Alors qu'ils furent longtemps limités à des contrôles par relais mécaniques, à commutateurs de position et à des chronomètres, les nouveaux systèmes sont basés sur les technologies des contrôles par ordinateur.

Des CPU (Central Processing Units) opérant en circuit fermé (close loop) permettent de maintenir les conditions de moulage à leur niveau optimum.

Dans plusieurs cas, des moniteurs (CRT), permettent de visualiser les conditions réelles en rapport avec celles définies lors de la mise en route.

Toutes ces mesures sont nécessaires pour produire efficacement et pour se maintenir compétitif. Car dans l'extrusion soufflage une production de qualité ne peut être obtenue que si les systèmes sont maintenus à l'intérieur d'une fourchette d'ajustement très étroite.

La raison de cette limitation au niveau contrôle, vient du fait que le procédé se fait en trois paliers et que les conditions de la matière sont modifiées à chacune de ces étapes.

La matière est d'abord plastifiée et homogénéisée de façon à pouvoir être extrudée. Elle est ensuite formée en paraison chaude et élastique, pour enfin être étirée et refroidie.

Le comportement rhéologique conditionné par la température du matériel de même que l'orientation et la relaxation moléculaire causés lors de son extrusion, sont deux des principales variables qui peuvent grandement influencer le comportement de la paraison et par conséquence la qualité du produit gonflé.

L'état de la paraison sera aussi influencé par le synchronisme des étapes du cycle de moulage. Le temps d'attente de la paraison extrudée durant le refroidissement de la pièce ou durant le retour du moule de même que le temps d'attente de la matière dans l'accumulateur modifient le comportement du plastique et ont des effets directs sur le produit moulé.

FORMATION DE LA PARAISON ET CONTROLE DES EPAISSEURS

Le contrôle et la calibration de la paraison sont les éléments fondamentaux du procédé d'extrusion soufflage.

L'état de la paraison met en cause tous les autres éléments du contrôle du procédé, de la plastification du matériel jusqu'à son étirement dans le moule.

D'une part, l'état de la paraison est influencé par le type de matériel, le degré et la qualité de sa plastification de même que par la vitesse d'extrusion ainsi que la forme et les dimensions de la filière.

D'autre part, l'état de la paraison influencera l'état du produit fini aux niveaux de sa résistance mécanique, son épaisseur, son poids et sa qualité de surface.

Le contrôle de la paraison, tant en ce qui a trait aux facteurs conduisant à sa formation qu'à ceux qui en résultent, est l'élément clef assurant la maîtrise du procédé d'extrusion soufflage.

Plusieurs analyses faites à ce jour, visent à établir une corrélation entre le profil de la paraison et celui du produit fini. Les éléments généralement considérés dans ces études, sont les suivants:

- Variation circonférentielle des épaisseurs;
- Variation longitudinale des épaisseurs;
- Enflure sous relaxation (die swell).

VARIATION LONGITUDINALE DES EPAISSEURS

Cette technique est mieux connue sous le terme de "programmation de la paraison". Elle consiste à modifier l'épaisseur annulaire de l'espace entre le poinçon et la filière, afin de modifier l'épaisseur de la paraison.

Il y a deux niveaux de programmations de l'épaisseur de la paraison:

- Modification globale du poids de la pièce;

- Contrôle local de l'épaisseur moulée.

La première fonction, moins flexible que la deuxième, permet d'ajuster la quantité totale de matière utilisée pour la formation de la paraison. C'est une méthode d'ajustement relativement limitée et qui ne tient pas compte des variations locales d'épaisseur.

Le deuxième niveau de contrôle permet de modifier localement l'épaisseur de la paraison sur une certaine portion de sa longueur, il s'agit d'une véritable programmation des épaisseurs en fonction du cycle d'extrusion.

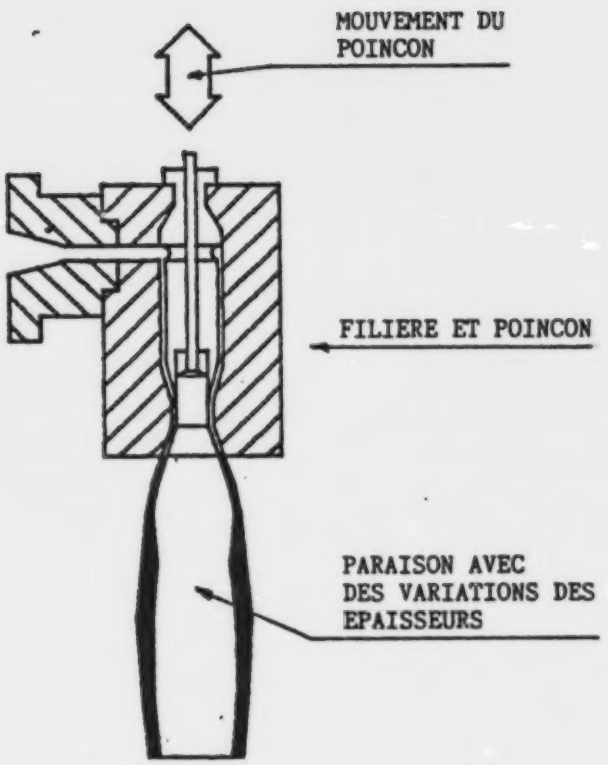
La configuration de la pièce impose normalement différents taux d'étirement de la paraison, en fonction de son profil. Comme le diamètre de la paraison est théoriquement le même sur toute sa longueur, il en résulte qu'un étirement plus grand produit une paroi plus mince.

La façon de maintenir une paroi d'épaisseur relativement uniforme est de faire en sorte que la paraison soit plus épaisse dans les zones où un étirement plus grand est prévu.

Cette variation d'épaisseur est obtenue en modifiant l'espace entre la filière et le poinçon, durant l'extrusion de la paraison.

En répartissant plus uniformément la quantité de matériel, il est possible de maintenir un poids minimum tout en rencontrant les normes de résistances mécaniques.

PROGRAMMATION DE LA PARAISON
CONTROLE LONGITUDINAL DES EPAISSEURS



VARIATION CIRCONFERENTIELLE DES EPAISSEURS

Pour produire efficacement certains profils de pièces, il n'est pas suffisant de modifier le profil longitudinal de la paraison, mais il faut aussi en ajuster le profil circonférentiel.

Cette situation apparaît entre autre dans le cas de bouteilles qui ne sont ni circulaires ni elliptiques. Il faut alors extruder une paraison ayant des variations circonférentielles des épaisseurs, afin de compenser pour les différences d'étirement.

Par exemple, le moulage d'une bouteille ayant une section carrée, est amélioré en utilisant une filière à cannelures. Ce profil de filière donne une paraison avec des surépaisseurs situées dans l'axe d'extrusion.

Une modification locale de la filière, couplé au mouvement du poinçon permet de limiter la modification de profil à une seule section de la paraison, permettant alors la programmation complète du système.

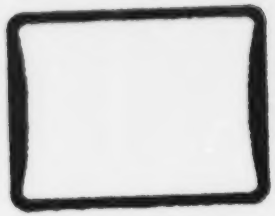
La modification et l'ajustement des filières donnant un ajustement circonférentiel de l'épaisseur de la paraison, est une technique relativement complexe. Compte tenu du comportement rhéologique du matériel et des effets de la forme de la filière sur l'écoulement du plastique, la mise au point nécessite généralement une phase plus ou moins importante "d'essais et erreurs".

Encore plus spécialisés que les filières décrites plus haut, sont les systèmes d'extrusion de la paraison par filière à "conformateur annulaire". Il s'agit d'un mécanisme situé à la base de la filière, qui est contrôlé mécaniquement et dont la conception permet un ajustement local par pincement.

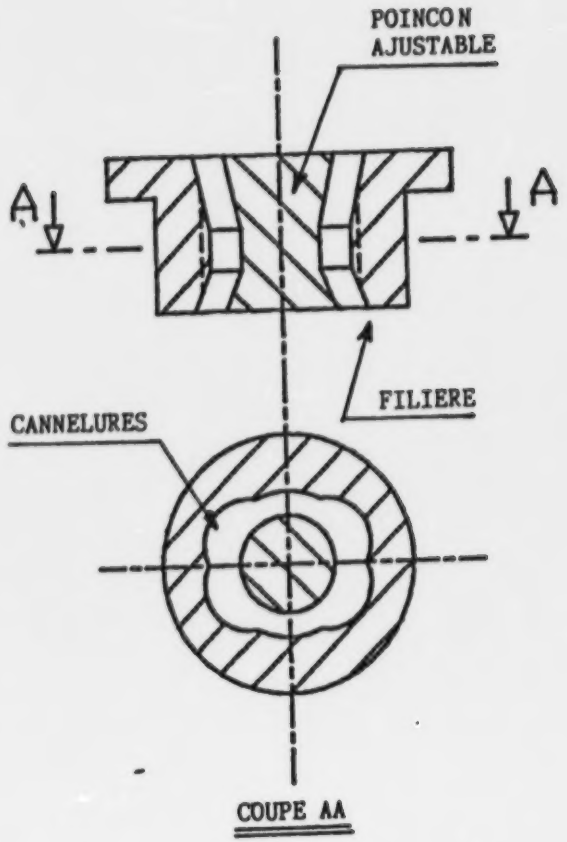
Ce système est synchronisé avec la programmation longitudinale de manière à offrir un maximum de flexibilité dans le profil de la paraison.

PROGRAMMATION DE LA PARAISON
CONTROLE CIRCONFERENTIEL DES EPAISSEURS

SECTION TYPE, SANS
CONTROLE DES EPAISSEURS



SECTION TYPE, AVEC
CONTROLE DES EPAISSEURS



COUPE AA

ENFLURE SOUS RELAXATION (DIE SWELL)

Lorsque le plastique fondu est extrudé par la filière, les forces de cisaillement produisent une orientation des chaînes moléculaires. A l'extérieur de la filière, les chaînes moléculaires tendent à reprendre une structure non orientée.

Les chaînes étirées et alignées les unes contres les autres occupent moins de volume que les mêmes chaînes "non alignées" et dispersées dans toutes les directions. Cette relaxation moléculaire, à la sortie de la filière, qui permet aux chaînes de reprendre une position isotropique, résulte donc en une augmentation du volume spécifique.

Ce phénomène, (die swell) se manifeste surtout par un gonflement de l'épaisseur de la paroi et une augmentation du diamètre de la paraison.

Les analyses faites à date, tendent à démontrer que les principaux facteurs affectant le taux d'enflure sous relaxation sont la forme de la filière et le type de polymère extrudé.

EFFET DE LA FORME DE LA FILIERE SUR L'ENFLURE

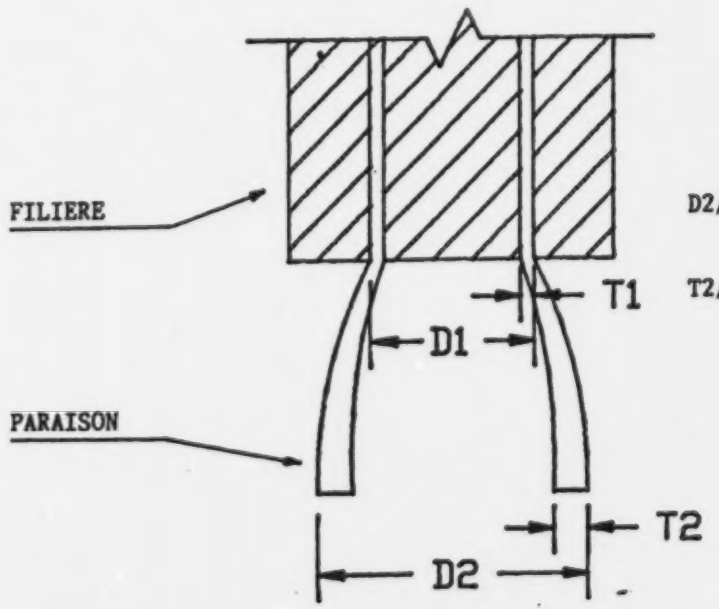
En ce qui à trait à la forme de la filière, il y a trois situations possibles:

- Filière parallèle;
- Filière divergente;
- FIlière convergente.

FILIERE PARALLELE

Une filière parallèle, produit une orientation moléculaire moyenne et par conséquent une enflure moyenne, tant du diamètre que de l'épaisseur.

ENFLURE DE LA PARAISON, CAUSEE PAR LA RELAXATION MOLECULAIRE



D2/D1 = ENFLURE DU DIAMETRE

T2/T1 = ENFLURE DE LA PAROI

FILIERE DIVERGENTE

La filière divergente donne une certaine orientation circulaire des molécules, qui restreint le taux d'enflure du diamètre mais qui a peu d'effets sur l'enflure de la paroi. A la limite une forte orientation "circulaire" pourrait même causer une enflure négative du diamètre.

FILIERE CONVERGENTE

La filière convergente augmente l'orientation moléculaire en surface de la paraison et produit une enflure plus importante. Dans le cas où le poinçon et la filière convergent parallèlement, l'enflure du diamètre est forte mais l'enflure en épaisseur n'est pas plus importante que pour les autres types de filières. Par contre, lorsque les diamètres du poinçon et de la filière sont eux aussi convergents, il en résulte une plus forte enflure de l'épaisseur de la paroi.

Ces résultats démontrent qu'en fonction de la forme de la filière, il est possible d'agir indépendamment sur l'enflure du diamètre ou sur celui de l'enflure de la paroi de la paraison.

EFFET DU MATERIEL SUR L'ENFLURE DE LA PARAISON

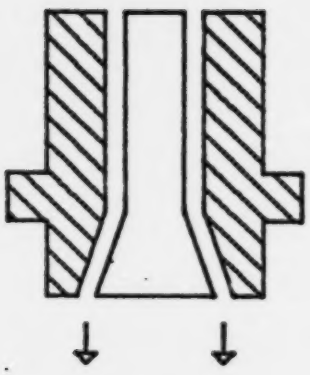
En plus de la forme de la filière, le comportement rhéologique et la structure moléculaire de la résine sont des facteurs qui influencent aussi l'enflure sous relaxation.

Par exemple, la réponse du coulis de résine sous l'effet de cisaillement, le degré d'alignement que les molécules peuvent subir durant l'extrusion et leur taux spécifique de relaxation, sont quelques uns des éléments influençant l'enflure que subira la paraison.

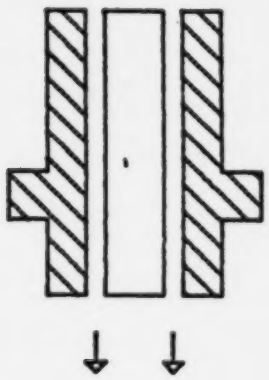
Peu importe le type de matériel, il semble qu'ils subissent tous les mêmes genres de modifications en fonction du type de filière utilisée.

Enfin, il faut tenir compte du facteur temps dans la relaxation moléculaire, car de 60 à 80 % celle-ci a lieu dans les premières secondes suivant l'extrusion.

DIVERS TYPES DE FILIERES

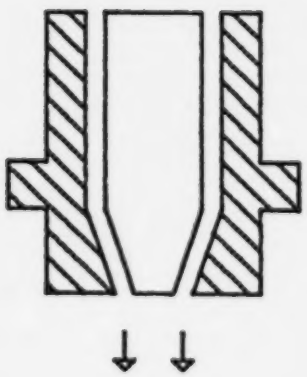


FILIERE DIVERGENTE



FILIERE PARALLELE

FILIERE CONVERGENTE
A DIAMETRE CONVERGENT



FILIERE CONVERGENTE
DE TYPE PARALLELE

CONTROLE DE LA QUALITE

Largement utilisés dans le domaine de l'emballage, les produits moulés par extrusion soufflage sont souvent inspectés à 100 %.. L'étanchéité et l'épaisseur des pièces étant parmi les principaux points de contrôle.

La procédure de contrôle la plus avantageuse consiste à mesurer certains critères spécifiques dès la fabrication de l'objet. En couplant les systèmes de contrôles à ceux réglant les paramètres d'ajustement de la machine, il est alors possible de les modifier par un mécanisme de "Feed back" automatique.

Les points de contrôle les plus fréquemment utilisés sont:

- Contrôle de la longueur de la paraison;
- Pesée des pièce, en automatique;
- Vérification des épaisseurs;
- Test d'étanchéité.

CONTROLE DE LA LONGUEUR DE LA PARAISON

De légères déviations dans les paramètres de moulage ou dans les caractéristiques du matériel influencent directement la longueur de la paraison.

Pour obtenir des produits de qualité uniforme, il est avantageux d'ajuster le cycle de façon à maintenir constantes, la forme et la longueur de la paraison d'un cycle à l'autre.

Une méthode de plus en plus utilisée consiste à utiliser un lecteur optique relié à des chronomètres. Ces systèmes sont organisés de façon à maintenir la longueur de la paraison à l'intérieur de la fourchette prescrite. L'opération se fait en contrôlant la vitesse de la vis ou du piston d'extrusion.

PESEE DES PIECES EN AUTOMATIQUE

En plus de contrôler la longueur de la paraison il importe, pour maintenir une qualité constante, de s'assurer que les pièces rencontrent le poids minimum requis.

Un poids inférieur à la limite prescrite est un indicateur d'une faiblesse structurale causée par une épaisseur trop faible.

Il est possible d'équiper le système d'extrusion soufflage d'une balance automatique qui mesure le poids de chaque produit moulé et le compare à la norme pré-définie.

Lorsque le poids est hors des limites de la déviation standard, le système est conçu de façon à modifier l'ouverture de la filière afin de ramener le poids à l'intérieur de la norme.

Tout en maintenant le même profil de programmation de l'épaisseur, il est possible de modifier globalement l'ouverture de la filière afin de changer le poids des pièces et par conséquent leur épaisseur moyenne.

VERIFICATION DES EPAISSEURS

En plus des mesures indirectes, telles que celles données par le contrôle du poids des pièces, il est possible de mesurer directement les épaisseurs des produits moulés.

Les méthodes conventionnelles de mesure des épaisseurs, telles que les mesures mécaniques, sont généralement non adéquates pour contrôler les épaisseurs des pièces moulées par soufflage. La limitation étant bien entendue la forme qui réduit l'accessibilité pour les mesures.

On a plutôt recours à des équipements électroniques ou magnétiques qui donnent l'épaisseur en mesurant l'absorption du signal au travers la paroi.

Les systèmes magnétiques exigent toutefois qu'un capteur soit placé à l'intérieur de la paroi. L'appareil enregistre alors la perte d'intensité magnétique et l'épaisseur est alors déduite par calcul.

Les systèmes basés sur l'absorption infrarouge nécessitent aussi un accès de part et d'autre de la paroi à mesurer. Contrairement aux moyens magnétiques, les systèmes infrarouge n'ont pas à être directement appuyés contre la paroi. Ceci en simplifie l'utilisation.

Les méthodes par ultra-sons peuvent être faites en ayant accès à un seul côté de la pièce. Il consiste en un écho qui est réfléchit dès que le signal atteint une matière de densité différente de celle de la paroi.

TEST D'ETANCHEITE

Ce test est particulièrement important dans le domaine de l'emballage. Certains équipements mécaniques permettent de contrôler 100% des pièces produites.

Il s'agit généralement d'un test fait sous pression d'air, avec un lecteur qui enregistre les fuites éventuelles.

En plus de détecter les porosités dans la pièce, ce test permet de vérifier la qualité des filets de même que la résistance mécanique du contenant sous pression.

GRILLE DE CORRECTION DES DEFAUTS D'EXTRUSION SOUFFLAGE

DEFAUTS / CORRECTIONS	TORSION DANS PARAISON	SURFACE RUGUEUSE DE PARAISON	ETIRAGE DE PARAISON	LIGNES DANS PARAISON	GONFLAGE DE PIECE INCOMPLET	SURFACE DE PIECE RUGUEUSE	PIECE TROP MINCE	MAUVAISE SOUDURE JOINT MOULE	RETRAIT EXCESSIF DANS PIECE	COLLAGE DANS LE MOULE	LIGNES BRUNES SUR PARAISON	PIECE MANQUE DE LUSTRE
AUGMENTER TEMPERATURE FILIERE												X
UNIFORMISER TEMPERATURE PARAISON	X											
AUGMENTER TEMPERATURE EXTRUSION		X						X				X
REDUIRE VITESSE D'EXTRUSION		X										
UTILISER RESINE A PLUS BAS MELT INDEX			X				X					
REDUIRE TEMPERATURE D'EXTRUSION			X				X	X			X	
AUGMENTER VITESSE D'EXTRUSION			X				X					
POLIR FILIERE ET POINCON				X								
NETTOYER EQUIPEMENT D'EXTRUSION				X								
AUGMENTER PRESSION GONFLAGE					X	X			X			
ALLONGER TEMPS DE GONFLAGE					X							
AUGMENTER TEMPERATURE AIR DE GONFLAGE					X							
VERIFIER EVENTS SUR LE MOULE						X						
VERIFIER LE FINI DU MOULE						X				X		X
AJUSTER L'ESPACE FILIERE/POINCON	X						X					
REDUIRE LA PRESSION DE GONFLAGE								X				
AJUSTER FORCE FERMETURE DU MOULE								X				
ALLONGER LE TEMPS DE REFROIDISSEMENT									X	X		
REDUIRE LA TEMPERATURE DU MOULE								X		X		
AJUSTER TEMPERATURE POINCON/FILIERE		X	X									
REDUIRE LE TEMPS DE RESIDENCE											X	

LES MATERIAUX UTILISES DANS L'EXTRUSION SOUFFLAGE

NORMES GENERALES

Théoriquement, tous les types de thermoplastiques pourraient être utilisés dans le moulage par extrusion soufflage.

Cependant, seuls des grades spécifiques sont employés. Cette situation est attribuable aux contraintes apportées par la spécificité de la technique de moulage.

La matière doit d'abord être extrudée verticalement et son indice de fluidité doit être tel qu'il permet une bonne mise en forme sans toutefois provoquer un étirement excessif de la paraison sous son propre poids.

Une fois extrudée, la paraison coincée dans le moule, doit être gonflée de manière à rejoindre toutes les surfaces du moule. La matière doit supporter cet étirement de manière à bien épouser les formes du moule.

Au-delà des paramètres reliés au procédé, il faut compter avec ceux fixés par le produit. Des facteurs tels que la résistance mécanique ou à fissuration sous contraintes font partis de cette liste de contraintes spécifiques à l'utilisation.

La majorité des fournisseurs de matières premières offrent des grades de résines spécialement adaptés pour l'extrusion soufflage. Règle générale, les caractéristiques de celles-ci étant au niveaux de leur densité et de leur indice de fluidité.

LES DIVERS GRADES DE MATERIAUX

Pour des raisons de "marchés", les polyoléfines et les PVC sont les deux principaux plastiques utilisés par extrusion soufflage.

Le polyéthylène à haute densité est largement employé pour le moulage des contenants et autres objets creux. C'est une matière économique offrant une certaine résistance à la corrosion et qui se transforme bien.

Dans la plupart des pays industrialisés, le HDPE occupe plus de 50% de la consommation totale de résine utilisée pour le soufflage.

En Europe, le PVC vient au deuxième rang au niveau de la consommation des résines de soufflage. Aux USA, le deuxième rang est occupé par le PET, alors qu'au Japon, il est partagé par les LDPE et PET.

Bien que le soufflage ait toujours connu une croissance remarquable, son utilisation s'élargie de plus en plus rapidement. Les nouvelles résines telles que PET et les grades d'ingénierie sont en partie responsables de cette situation.

Le PET ouvre le marché des bouteilles pour les boissons gazeuses, ceci est dû à sa bonne résistance aux boissons carbonatés.

Au niveau des résines d'ingénierie, ils s'agit de grades tels que les polycarbonates, les nylons et les acétales qui sont maintenant compatibles avec le procédé de soufflage.

Ces résines ouvrent de nouveaux champs d'application pour le soufflage et qui sont dans des secteurs non traditionnels, tels que les marchés de la bureautique ou des composantes d'habillage automobile.

Parmi les nouveaux grades de résines pour extrusion soufflage, il faut enfin noter certains thermoplastiques élastomériques (TPE) qui sont employés dans le domaine automobile.

HDPE

La majeure partie du HDPE utilisé par soufflage sert le marché des contenants d'emballage. Les propriétés de la résine varient en fonction du type de marché.

Les contenants pour les détersifs et les produits chimiques exigent des HDPE ayant une bonne résistance à la fissuration sous contrainte et une résistance à l'impact. En général, les grades ayant une basse densité, un bas indice de fluidité et une large distribution moléculaire, répondent mieux à ces exigences.

Pour des contenants alimentaires (lait, eau, ect.), la rigidité est le principal facteur, les bouteilles peuvent alors être plus minces et d'un coût plus compétitif. Dans ce cas, des grades de HDPE ayant une plus forte densité et une distribution des poids moléculaires plus étroites, sont employés.

Les HDPE peuvent être aussi utilisés pour le moulage des grands contenants, tels que des barils de 45 gallons. Dans ce cas, des grades à haut poids moléculaire (HMW-HDPE), sont surtout employés.

La perméabilité aux gaz est un des défauts du polyéthylène. Il est cependant possible de palier à cet inconvénient en bâtissant une barrière imperméable à l'intérieur de la pièce.

Pour y arriver on a recours à l'injection de gaz, tels que le fluor ou le chlore, qui sous certaines conditions réagissent avec le polyéthylène pour former une croûte imperméable.

Cette technique encore nouvelle, ouvre la voie à l'utilisation du HDPE pour des applications telles que les réservoirs à essence d'automobile.

LDPE

Les polyéthylènes à basse densité sont moins utilisés à cause de leur plus faible résistance structurale.

On les retrouvent surtout dans le moulage de certains types de bouteilles "écrasables" (squeeze-type).

POLYPROPYLENE

Jusqu'à récemment, le polypropylène était peu utilisé par le procédé de soufflage. Ce matériel n'étant pas d'un coût compétitif avec le HDPE et n'offrant pas une bonne résistance au froid.

L'introduction de nouveaux copolymères à base de polypropylène est en train de changer cette situation. Ceux-ci permettent de mettre à profit les avantages structuraux offerts par ce matériau.

Il est alors possible de produire des pièces plus minces et tout aussi résistantes, le PP devenant alors compétitif au HDPE.

Le polypropylène se prête très bien à la bi-orientation soufflage. Cette technique améliore considérablement les propriétés mécaniques du PP.

Un des marchés sur lequel le polypropylène est actuellement testé est celui du moulage des contenants pour les huiles moteur.

PVC

Le succès du PVC dans le domaine de l'extrusion soufflage des contenants, est en majeur partie dû à ses bonnes propriétés mécaniques, à sa bonne tenue aux agents corrosifs et surtout à sa grande transparence.

L'utilisation du PVC fut temporairement freinée par des controverses au sujet de son utilisation dans le secteur alimentaire.

Le PVC étant sensible à la dégradation thermique, il doit contenir des stabilisants, qui dans certains cas peuvent en limiter l'utilisation sur certains marchés.

Le PVC est désormais approuvé pour plusieurs applications alimentaires et de nouveaux types de stabilisants ont réduits ses effets sur le goût et les odeurs qu'il donnait aux aliments.

PET

Les polytéréphtalates d'éthylène (PET) connaissent depuis quelques années un succès important dans le marché des bouteilles de boisson gazeuse.

La bonne tenue au CO est la principale raison justifiant l'utilisation de cette résine.

Le PET est un matériel structural, qui offre une bonne transparence. Son utilisation est de plus en plus répandue et elle touche maintenant même le domaine des bouteilles de bière. Ses principales limitations sont sa forte reprise en humidité de même que sa faible résistance thermique, qui se situe à 70 C.

Il faut enfin noter que la grande majorité du soufflage du PET se fait par injection soufflage et que dans plusieurs cas il y a également bi-orientation.

L'injection soufflage est mieux adaptée au matériau et aux produits tandis que la bi-orientation permet d'en accroître sensiblement ses propriétés mécaniques.

RESINES D'INGENIERIE

L'introduction des résines d'ingénierie aux techniques de soufflage élargit considérablement le potentiel de la technique.

Parmi les résines d'ingénierie qui sont déjà adaptées au procédé de soufflage, il y a le polycarbonate, le ABS, certains nylons, les acétales et les polysulfones.

Plusieurs nouvelles catégories de type "hybrides" telles que les "BEXLOY" de DUPONT et "XENOY" de GENERAL ELECTRIQUE sont aussi disponibles dans des grades de soufflage.

La mise en forme des résines d'ingénierie exige souvent des modifications aux équipements. La puissance et la configuration des unités de plastification doivent être modifiées. De même il faut plus de force de fermeture sur les presses, dû à des pressions de soufflage plus grandes.

Les moules ont souvent avantage à être chauffés, à cause de la haute viscosité des matières ce qui en rend la mise en forme plus difficile.

TPE

Les TPE sont des élastomères thermoplastiques. L'adaptation de ces résines au procédé de soufflage sert déjà dans l'industrie automobile, pour la fabrication de couvre joints.

Comme pour les résines d'ingénierie, les fournisseurs ont mis au point de nombreux grades de résines TPE, qui sont très prometteurs. Parmi ceux-ci, il y a le "HYTREL", un copolyester produit par DUPONT, de même que le "LOMOD" de GENERAL ELECTRIC.

Le moulage des TPE exige l'utilisation d'équipements plus précis, surtout à cause des étroites plages de température acceptées pour la transformation de ces résines.

BILAN TECHNIQUE DU PROCEDE DE SOUFFLAGE

CARACTERISTIQUES DU PROCEDE ET DE SES VARIANTES

Le procédé de soufflage, bien qu'il représente depuis longtemps un volume d'affaire appréciable pour l'industrie du plastique, demeure une technique relativement "mal connue".

Ce fait est sans doute relié à la spécificité de la technique, à ses nombreuses variantes et au fait qu'elle s'adresse à un secteur de marché très bien défini: celui de l'emballage.

L'extrusion soufflage ou l'injection soufflage sont souvent traitées dans les manuels techniques en tant que des variantes des technologies d'extrusion ou de soufflage.

Le procédé fut longtemps limité aux les HDPE et aux PVC. Aujourd'hui, l'élargissement de la technique se fait sur deux fronts:

- Nouvelles applications dans les emballages;

- Secteur des composantes d'habillage.

Dans le premier cas, il s'agit entre autre, de marchés tels que celui des bouteilles d'eau gazeuse, des barils de 45 gallons et des réservoirs à essence d'automobile.

Dans le cas des pièces d'habillage et de structure, il peut s'agir des composantes automobile (pare-chocs et déflecteurs d'air) ou de composantes faites en double parois (tables d'ordinateur, porte bagages ect.)

Les variantes du procédé, que sont l'injection soufflage, la coextrusion, la bi-orientation de même que l'adaptation de résines d'ingénierie et de nouvelles résines "conventionnelles" sont quelques uns des facteurs qui contribuent aussi à la mise en valeur du procédé de soufflage.

COMPARAISON ENTRE LES VARIANTES DU PROCEDE DE SOUFFLAGE

La section suivante précise quelques caractéristiques propres aux diverses variantes de soufflage.

EXTRUSION SOUFFLAGE EN CONTINU

- Adapté aux petites pièces (moins de 2.5 gals.)
- Contrôle d'épaisseur obtenu par programmation de la filière (possible bien que parfois difficile)
- Limitation dans la reproduction de fins détails
- Adapté à la coextrusion
- Biorientation possible
- Choix de matériaux relativement limité

EXTRUSION SOUFFLAGE INTERMITENTE

- Adapté aux grosses et très grosses pièces
- Contrôle d'épaisseur obtenu par programmation de la filière (possible bien que parfois difficile)
- Limitation dans la reproduction de fins détails
- Adapté à la coextrusion
- Biorientation possible
- Choix de matériaux relativement limité

INJECTION SOUFFLAGE

- Surtout utilisé pour les petites pièces (moins de 32 oz.)
- Permet un meilleur fini de surface que celui obtenu par les méthodes d'extrusion soufflage
- Bon contrôle d'épaisseur donné par le préforme injecté dans un moule mâle/femelle
- Capable de produire de fins détails, mais limité à des formes relativement simples
- Production multicouches possible mais avec un équipement relativement complexe
- Adapté à une forte productivité
- Biorientation possible

LA CAO/FAO ET L'EXTRUSION SOUFFLAGE

Les techniques de conception et de fabrication assistées par ordinateur sont déjà largement répandues dans le domaine du moulage par injection des thermoplastiques.

Ces méthodes permettent de prédire certains comportements du produit et des matériaux de manière à optimiser le design.

La CAO/FAO peut aussi être adaptée à la production par soufflage. Cette technique nécessitant toutefois la mise au point de logiciels totalement différents et qui intègrent plusieurs fonctions.

Au niveau du design de la pièce, les avantages de la CAO sont bien définis. Il permettent de vérifier les formes et d'en valider l'esthétique.

En plus de l'aspect "marketing" de la forme, les logiciels conventionnels permettent de vérifier le comportement structural d'un contenant, en fonction de son épaisseur et du type de résine employée.

Une fois, la forme définie, les systèmes de FAO peuvent prendre la relève et usiner le moule. Au chapitre du refroidissement, il existe aussi des programmes qui sont en cours d'utilisation.

Là où l'extrusion soufflage est très spécifique, c'est au niveau du contrôle de l'épaisseur. Pour être vraiment efficace, un logiciel pour le soufflage devra tenir compte de certains paramètres de moulage tels que:

- La forme de la paraison;
- Les paliers de programmation d'épaisseurs;
- L'enflure sous relaxation (die swell);
- Le ratio d'étirement au soufflage;
- Les caractéristiques de la résine;
- Le temps de refroidissement;
- La perte de volume due au retrait;
- La résistance mécanique en fonction des épaisseurs obtenues au moulage.

TABLE DES MATIERES

I. QU'EST-CE QUE LA CFAO?

II. CONSEQUENCES SOCIAUX - ECONOMIQUES

III. METHODOLOGIE D'IMPLANTATION

IV. APPLICATIONS TYPIQUES

V. ACTIVITES A L'IGM

Georges Sallaucer

CNRC/IGM

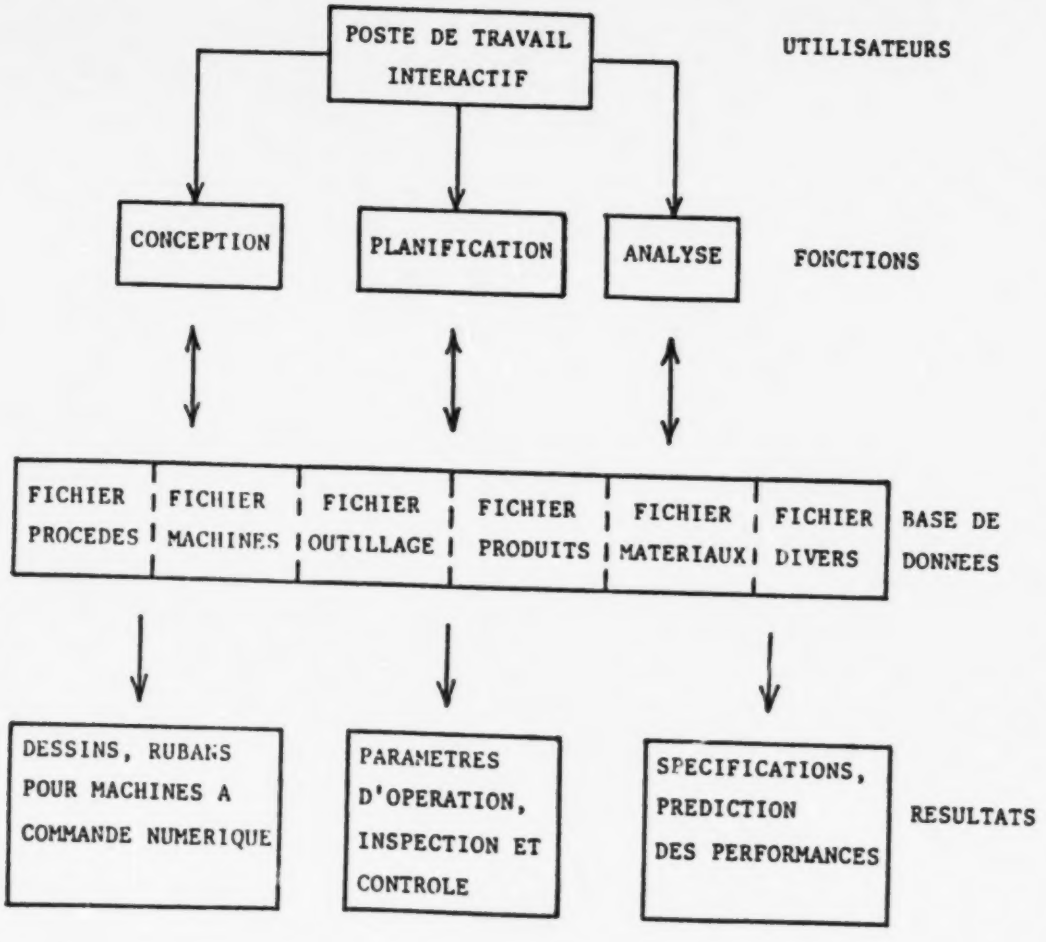


FIG. 1 LE CONCEPT DE LA CAO/FAO

INSTALLATION TYPIQUE D'UN SYSTEME INTEGRE

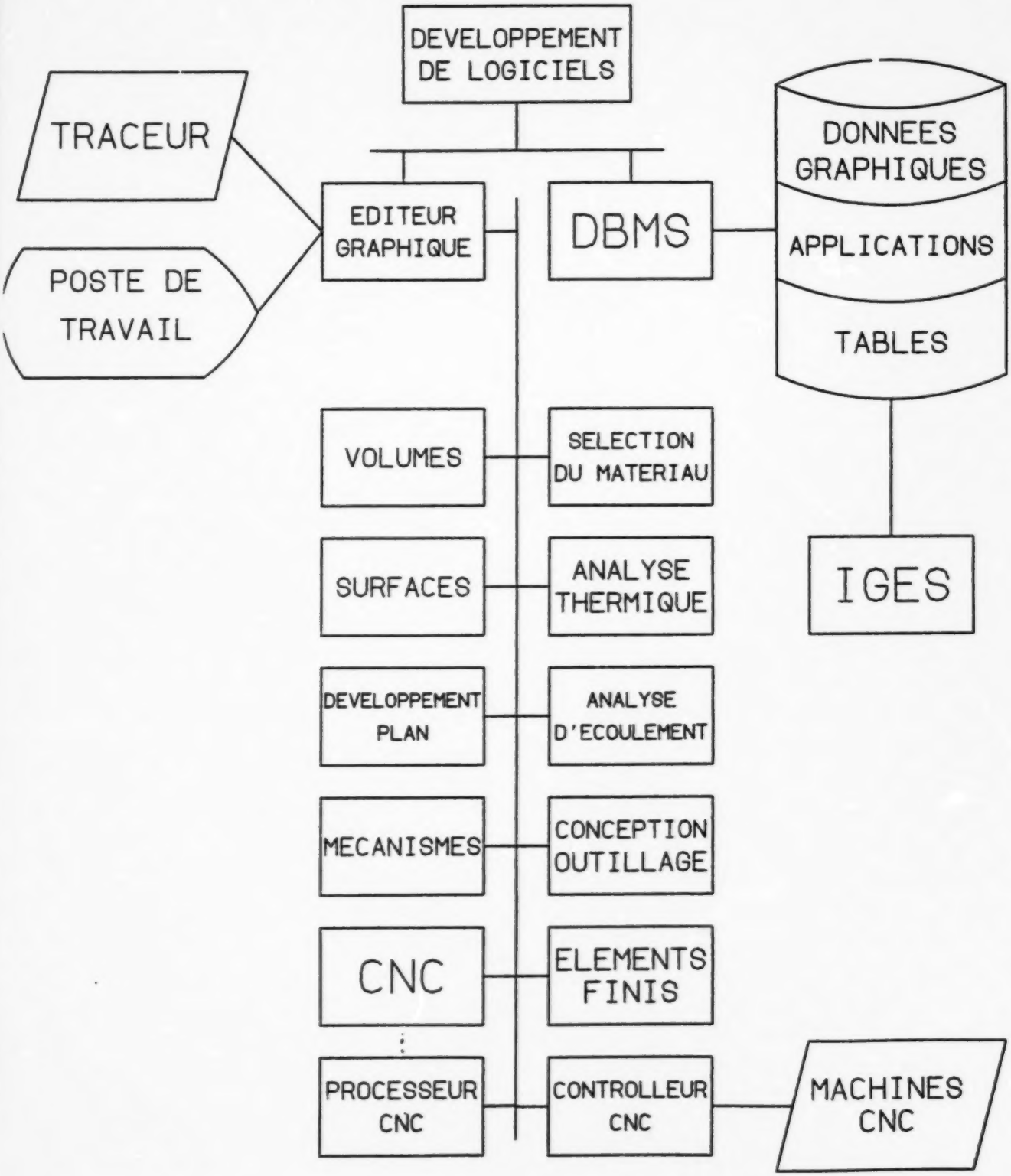


FIGURE 2

CONSEQUENCES SOCIAUX-ECONOMIQUES

- OUTIL DE COMMERCIALISATION
- MEILLEURE COMMUNICATION ET AGENCEMENT DE L'INFORMATION
- ATTIRER DU PERSONNEL QUALIFIE
- STANDARDISATION DE METHODES DE TRAVAIL
- DECENTRALISATION DES OPERATIONS
- AFFECTATION DU PERSONNEL A DES NOUVELLES TACHES
- NOUVELLES EXIGENCES DE FORMATION
- SITUATION DYNAMIQUE SUIVANT LES CHANGEMENTS TECHNOLOGIQUES
- COUT TRES DISPENDIEUX (EQUIPEMENT, LOGICIEL, ENTRETIEN, DEVELOPPEMENT)
- CREATION DE NOUVELLES COMPAGNIES ET ASSOCIATION ENTRE COMPAGNIES EXISTANTES

LA CFAO DANS L'INDUSTRIE DES PLASTIQUES.
L'ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTIVITE
PAR RAPPORT AUX METHODES CONVENTIONNELLES

DÉLAI DE LIVRAISON	20-50%
COÛT DE L'OUTILLAGE	10-30%
TAUX DE REBUT	5-10%
TEMPS DE CONCEPTION	40-60%
PRÉPARATION DE RUBAN À COMMANDE NUMÉRIQUE	50-65%
CYCLE DE PRODUCTION	10-30%
CONCEPTION DE MATRICES	40-60%
CONCEPTION DE MOULES	20-40%

IMPLANTATION DE LA CFAO

- DOUBLE CRITERE DE PRUDENCE;

  TECHNIQUE ET ECONOMIQUE

- SYNTHESE DES TECHNOLOGIES DE BASE

  GESTION DE BASE DE DONNEES

  MODELISATION MATHEMATIQUE

  CONTROLE DE LA PRODUCTION

  INFOGRAPHIE

- PLAN D'INVESTISSEMENT STRATEGIQUE;

  (MECANISATION - SYSTEMATISATION)

- DEVELOPPEMENT PROGRESSIF:

  PROJET PILOTE

  APPROCHE GENERIQUE

  SYSTEME MODULAIRE

MATÉRIAUX - PROCÉDÉS - COMPORTEMENT

COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX		- ÉLASTIQUE, VISQUEUX - VISCOÉLASTIQUE, VISCOPLASTIQUE - ISOTROPIQUE, ANISOTROPIQUE
PHÉNOMÈNES RELIÉS AUX PROCÉDÉS DE MISE EN FORME (TRANSITOIRE OU STATIONNAIRE)	ÉCOULEMENT	- LAMINAIRE, TURBULENT
	CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS	- CISAILLEMENT SIMPLE/PLAN - TENSION (ÉLONGATION) - COMBINÉES
	ÉCHANGES THERMIQUES (ISOTHERMIQUES OU NON)	- CONDUCTION - CONVECTION/LIBRE, FORCÉE - RAYONNEMENT
	RÉACTION CHIMIQUE	- CHANGEMENT DE PHASE AVEC RÉACTION - RÉTICULATION - VULCANISATION

IGM/SIMM, 4 AOÛT 1987

CHAMPS DE COMPÉTENCES

1. MODÉLISATION DES PROCÉDÉS
2. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX (ÉTATS SOLIDE ET LIQUIDE)
3. MODÉLISATION GRAPHIQUE
4. MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS
5. DÉVELOPPEMENT DES BASES DE DONNÉES
6. DÉVELOPPEMENT D'INTERFACES, COMMUNICATIONS
7. CONCEPTION DE PRODUIT ET D'OUTILLAGE
8. TRANSFORMATION DES MATÉRIAUX
9. CONTRÔLE DES PROCÉDÉS
10. ANALYSE DE STRUCTURE DES MATÉRIAUX

APPLICATIONS TYPIQUES DE LA CFAO

1. PROTHETIQUE
2. CORDONNERIE
3. ORFEVERIE
4. COUTURE
5. MOBILIER
6. TRANSPORT
7. ARCHITECTURE
8. PLOMBERIE
9. CARTOGRAPHIE
10. CIRCUITS ELECTRONIQUES
11. EXTRUSION
12. LAMINAGE
13. ETIRAGE
14. ESTAMPAGE
15. SOUDAGE
16. MOULAGE
17. FORGEAGE

LA CFAO APPLIQUÉE À LA MISE EN FORME DES PLASTIQUES

A) LA SÉLECTION DES MATÉRIAUX SELON LES EXIGENCES DE L'APPLICATION.

B) L'ANALYSE DU CYCLE DE PRODUCTION ET L'ÉVALUATION DU COÛT DES PRODUITS.

C) L'OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE MOULAGE; DURÉE DU CYCLE, PRESSION ET TEMPÉRATURE.

D) LA DÉTERMINATION DU PROFIL DE TEMPÉRATURE, ET DU TEMPS DE REFROIDISSEMENT DES PRODUITS ET LA CONCEPTION DES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT.

E) L'ANALYSE DES CONTRAINTES ET DES DÉFORMATIONS LORS DE LA CONCEPTION DES PRODUITS, DES ÉLÉMENTS DES MOULES OU DES MACHINES.

F) L'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION DES MATRICES ET MOULES COMPLEXES.

G) L'AUTOMATISATION ET LA STANDARDISATION DES PROCÉDURES DE DESSIN DE L'OUTILLAGE.

LA CFAO APPLIQUÉE À LA MISE EN FORME DES PLASTIQUES (Suite)

H) L'USAGE DES ROBOTS POUR LE CHARGEMENT DES INSERTS, LE TRANSFERT ENTRE STATIONS, LE PLACAGE, LES TRAITEMENTS THERMIQUES ET L'APPLICATION D'ADHÉSIF OU DE LUBRIFIANT, ETC.

I) LA PROGRAMMATION DE LA PARAISON DANS LE PROCÉDÉ DE MOULAGE PAR SOUFFLAGE.

J) LA FABRICATION DES MODÈLES ET DES ÉLECTRODES POUR L'USINAGE PAR ÉTINCELAGE, AVEC LES CORRECTIONS PROGRAMMÉES POUR LE RETRAIT AU MOULAGE.

K) LA VÉRIFICATION DU TRACÉ DE L'OUTIL DE COUPE POUR L'USINAGE À COMMANDE NUMÉRIQUE.

L) L'USINAGE DES ÉLÉMENTS SYMÉTRIQUES, DES PIÈCES MÂLES ET FEMELLES AVEC UN SEUL PROGRAMME ET LA TECHNIQUE DE L'IMAGE MIROIR.

M) LA PLANIFICATION DES PROCÉDÉS EN DÉFINISSANT LA NATURE ET LA SÉQUENCE DES OPÉRATIONS.

N) LE CONTRÔLE DE L'INVENTAIRE ET DES ÉCHÉANCIERS DE PRODUCTION.

O) LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ À TRAVERS UN SYSTÈME D'INSPECTION ET D'ÉVALUATION AUTOMATISÉ.

ACTIVITÉS DE L'IGM

"Système intégré pour la mise en forme des matériaux"

Activités de modélisation et simulation		Sous-activité
1.	Technologie des bases de données	. Propriétés des matériaux (Polymères, métaux et composites)
		. Limites des conditions d'opération
		. Base de données paramétriques
		. Règles de conception
2.	Système intégré	. Contrôle de procédé
		. Infographie
		. Interface homme-machine
		. Interface système-machine
3.	Transformation des matériaux	. Analyse d'écoulement
		. Analyse du refroidissement
		. Analyse du retrait
		. Conception de l'outillage (moule et matrice)
4.	Performance du produit	. Analyse structurelle
		. Modélisation par éléments finis
		. Optimisation de design
		. Sélection du matériau

LA PRODUCTIQUE ET LE GENIE DES MATERIAUX

par

Georges Salloum, Patrick Girard, Denis Charland
Conseil National de Recherches du Canada
Institut de Génie des Matériaux
75 Blvd de Mortagne
Boucherville, Québec, Canada J4B 6Y4

1. INTRODUCTION

Les applications de la productique (computer integrated manufacturing) s'élargissent de plus en plus particulièrement au niveau de la conception et fabrication assistées par ordinateur. Le passage des méthodes artisanales à l'ingénierie, l'apparition de matériaux, de produits et d'équipements nouveaux entraînent naturellement de nouvelles techniques de transformation et de mise en marché. Cet article est le premier d'une série de trois traitant de la productique. Il présente les possibilités de l'approche intégrée et la technologie des bases de données. Les articles suivants porteront sur la simulation des procédés et le comportement des produits.

Au Canada, on estime à plus de 3000 les compagnies qui seront en mesure d'utiliser cette technologie au cours des dix prochaines années. Cet acquis rendra l'industrie canadienne plus compétitive dans des secteurs aussi importants que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, l'électronique, la construction, l'électroménager, l'emballage, etc

2. PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES

A cause d'un manque de compréhension du comportement des matériaux tant lors de leur mise en forme que lors de leur mise en service, la productique éprouve quelques difficultés à s'affirmer dans le domaine industriel. L'Institut de génie des matériaux s'est fixé comme programme d'aider les entreprises à surmonter ces handicaps par le développement d'une connaissance au niveau national et ce, plus particulièrement dans les domaines du moulage des matières plastiques, du moulage sous pression des alliages métalliques et du formage des matériaux. Les interactions entre les recherches fondamentales et appliquées préoccupent le groupe de recherche en "Systèmes intégrés pour la mise

en forme des matériaux". Les thèmes de recherche développés (tableau 1) sont largement inspirés des problèmes rencontrés dans l'industrie .

Il s'agit là d'une constante adaptation et restructuration des processus de travail pour simplifier l'accès à l'information, et favoriser le transfert du savoir-faire aux entreprises. La réalisation nécessite une polarisation de l'intérêt commun de plusieurs compagnies pour les systèmes d'ingénierie assistée par ordinateur, le tout en étroite collaboration avec des universités et des autres laboratoires de recherche et de développement.

3. APPROCHE INTEGREE OU PRODUCTIQUE

La variété des disciplines impliquées et la complexité du processus de développement d'un produit exigent de la part du personnel utilisant un système intégré une excellente planification. De plus, l'expérience et le jugement des utilisateurs restent nécéssaires pour optimiser les méthodes de transformation physique des matériaux.

La simulation d'un processus de production, l'interprétation de celui-ci durant la phase de conception des produits et des outils de production et la transmission des renseignements obtenus à l'équipement de production forment ce qu'on appelle l'intégration. Cette démarche englobe les technologies suivantes:

- la gestion des bases de données.
- l'infographie.
- la modélisation mathématique.
- le contrôle de production.

Cette expérience de simulation complète depuis le cycle de production jusqu'aux conditions d'opération, aidera les utilisateurs potentiels à optimiser le design et le processus de fabrication des produits et de l'outillage. La figure 1 illustre la création d'un objet avec la technique de modélisation volumique servant de référence pour le système intégré. L'architecture générique pour la solution des problèmes, étant partie intégrante du système, implique que le processus de prise de décision dépende d'abord de critères d'acceptabilité basés sur les principes d'ingénierie, la science des matériaux, les pratiques de design, appropriées à la fabrication et ensuite de critères de compatibilité avec les décisions antérieures. Tel que montré à la figure 2, l'intégration combine donc les diverses technologies généralement reliées au procédé de mise en forme (matériaux, outillage, produits et machines).

4. TECHNOLOGIE DES BASES DE DONNEES

Cette technologie moderne est basée sur l'informatisation des propriétés et des paramètres captés en temps réel et transmis à l'unité de contrôle, en boucle fermée, pour une meilleure automatisation. Ainsi, la modélisation des procédés de mise en forme des matériaux implique la modélisation de leurs propriétés. Les modèles de simulation des procédés ne pouvant pas être plus précis que les données des matériaux sur les quelles ils sont basés.

Les ingénieurs doivent avoir accès non seulement aux meilleures valeurs de ces propriétés mais aussi aux limites d'incertitudes afin de développer des modèles plus fiables, les propriétés des matériaux variant selon certains paramètres (pression, température, temps et morphologie). Diverses équations mathématiques régissant les propriétés thermiques, rhéologiques et mécaniques sont disponibles pour les variables indiquées au tableau 2.

Il y a relation logique entre les différentes étapes du processus de développement des produits (définition, choix du materiau, comportement pendant la mise en forme et en service) et leurs bases de données respectives. Les principes de la technologie de groupe ont été utilisés lors du développement de la structure des bases de données sur les matériaux, l'outillage, les procédés et les produits. Ainsi, une base de données paramétrique a été développée pour les configurations les plus utilisées des systèmes d'alimentation des moules. Celle-ci tient compte des impératifs de conception et de fabrication, des caractéristiques des matériaux et des paramètres de moulage. La figure 3 montre la conception d'un seuil d'alimentation réalisé à l'aide de menus graphiques interactifs.

A partir des modèles volumiques de la pièce et du système d'alimentation (carotte, canal et seuil) le noyau et l'empreinte dans les plaques du moule seront générés par soustraction (figure 4). De plus, la modélisation volumique, permet de determiner la quantité de matière à injecter et à recycler. Ensuite, le coût de production peut être calculé et on peut procéder à la préparation du programme d'usinage du moule par commande numérique.

Le tableau 3 montre aussi que la base de données comprend entre autres les conditions limites d'opération, les caractéristiques de la matière fondue, la température du moule ainsi que des recommandations sur la force de fermeture, la vitesse, le temps de remplissage et la pression d'injection.

L'utilisateur peut choisir des valeurs initiales pour l'analyse ou vérifier si les résultats s'inscrivent dans les limites recommandées. Les programmes étant interactifs, l'étape de simulation du procédé prend fin lorsque les conditions d'opération optimales sont atteintes. Celles-ci sont alors communiquées aux équipements de transformation. Le contrôleur fournit des données spécifiques en temps réel et sur l'état de la production et pour l'analyse des problèmes potentiels.

CONCLUSION

La simulation, pierre angulaire de l'automatisation sans risque, permet d'éviter des erreurs coûteuses lors du cycle de développement d'un produit. Ainsi, une simulation de procédé permet d'analyser le comportement du matériau sous différentes conditions d'opération, de faciliter la production et d'améliorer le produit fini. Les résultats permettent également d'optimiser la conception de produits et d'outillage, de raccourcir le cycle de production et de réduire la consommation d'énergie. Ces simulations ne s'appliquent évidemment qu'aux problèmes suffisamment maîtrisés pour être décrits par une modélisation mathématique.

TABLEAU 1: THÊMES DE RECHERCHE SUR LES SYSTÊMES INTÉGRÉS
POUR LA MISE EN FORME DES MATÉRIAUX

DOMAINE	COMPOSANTES
Intégration et technologies des bases de données	*Gestion des base de données *Modélisation des propriétés des polymères, métaux et composites *Règles de conception et limites des conditions d'opération
Transformation des matériaux	*Simulation de l'écoulement et du refroidissement *Fabrication du produit et de l'équipement (moule, matrice et filière)
Performance du produit	*Simulation du comportement en service *Optimisation du design du produit

TABLEAU 2: LISTE DES PROPRIETES VARIABLES

Viscosité dynamique	Module d'élasticité
Densité	Module de cisaillement
Module d'élasticité en flexion	Capacité thermique spécifique
Conductivité thermique	Coefficient de poisson
Résistance à la rupture	Diffusivité thermique
Retrait au moulage	Enthalpie spécifique
Diffusivité thermique réelle	Nombre de prandtl

TABLEAU 3:CONDITIONS LIMITES D'OPERATION

Température de séchage	Temps de séchage
Température d'injection minimum	Température d'injection maximum
Température du fourreau arriere	Température du fourreau central
Température du fourreau avant	Température de la buse
Température minimum du moule	Température maximum du moule
Température moyenne du moule	Vitesse de rotation de la vis
Pression de fermeture minimum	Pression de fermeture maximum
Pression de remplissage minimum	Pression de remplissage maximum
Pression de remplissage moyenne	Temps de remplissage
Taux de cisaillement maximum	Contrainte de cisaillement maximum
Température de non écoulement	Pression de maintien minimum
Pression de maintien maximum	Pression arriére de la vis

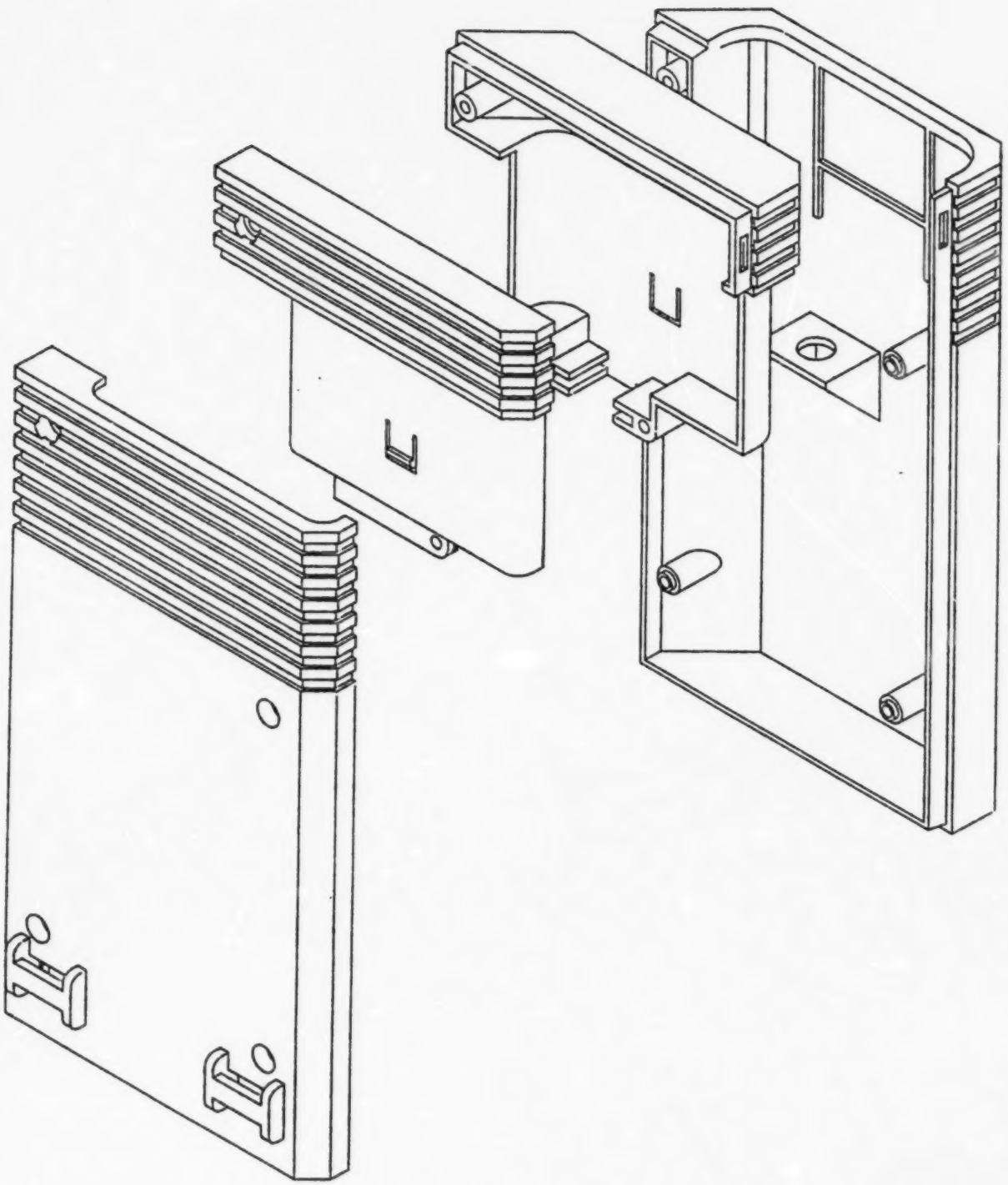
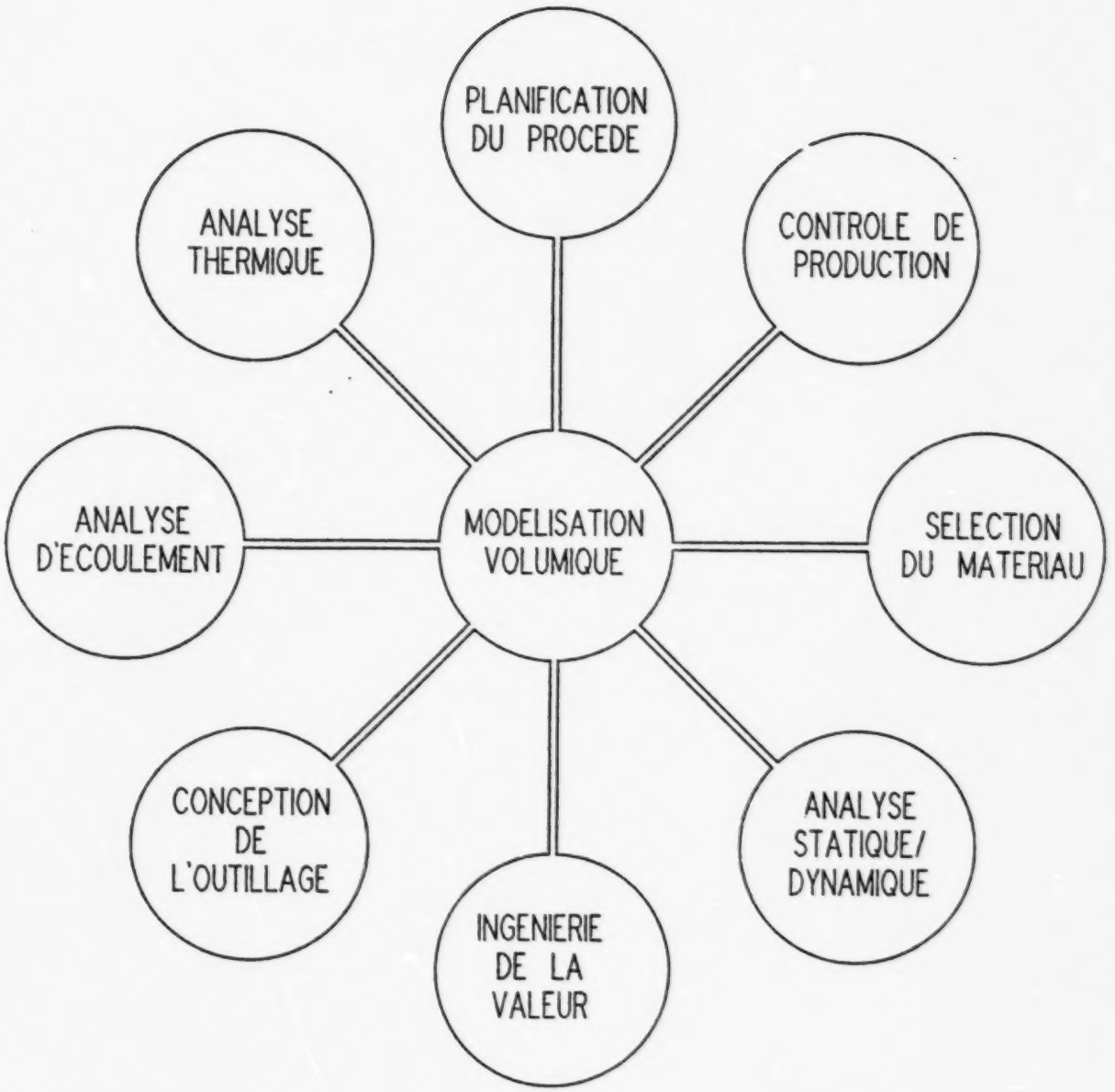


Figure 1: Représentation volumique d'une pièce



LE PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT D'UN PRODUIT AVEC UN SYSTEME DE FABRICATION INTEGRE.

FIGURE 2

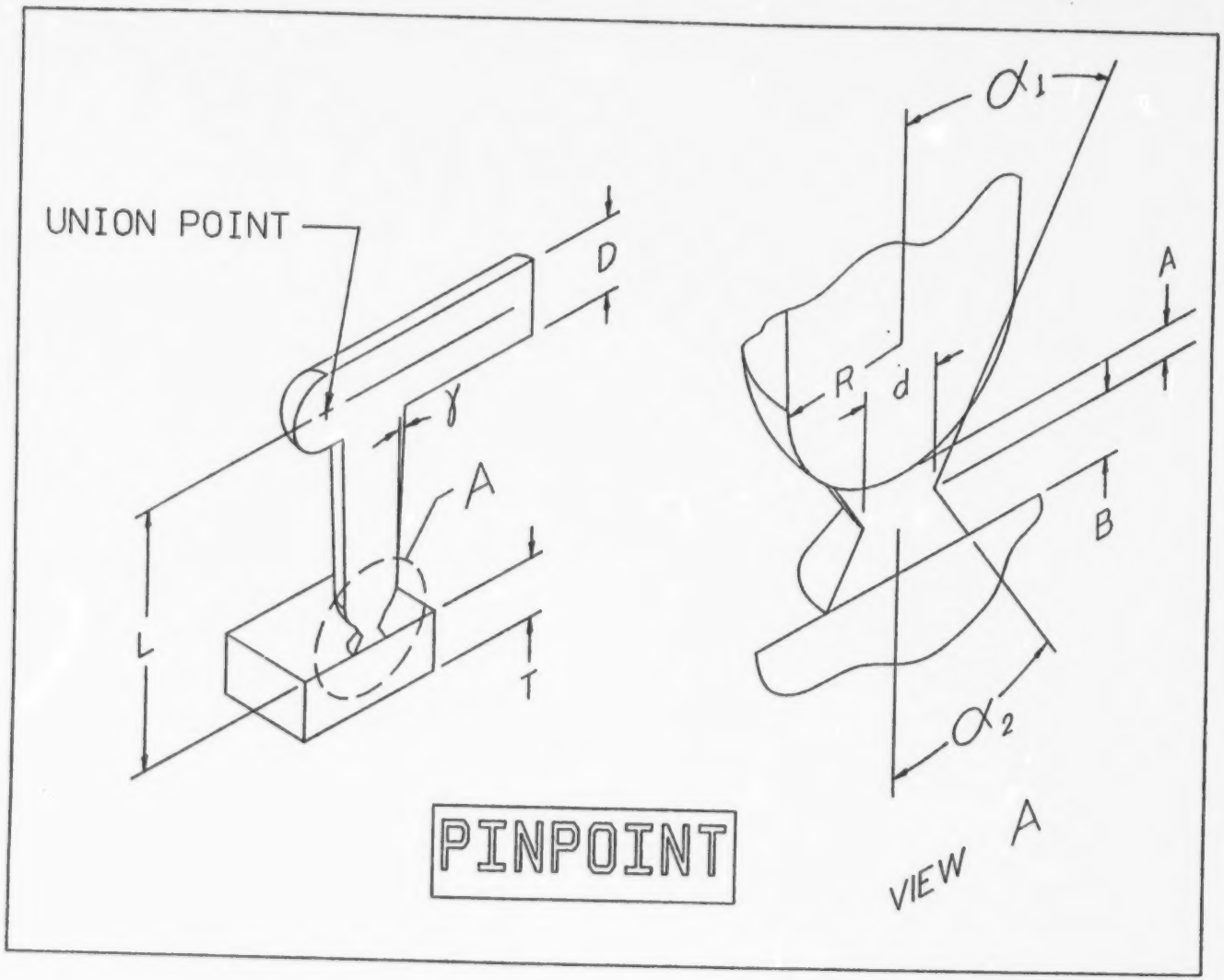


Figure 3: Exemple de seuil capillaire

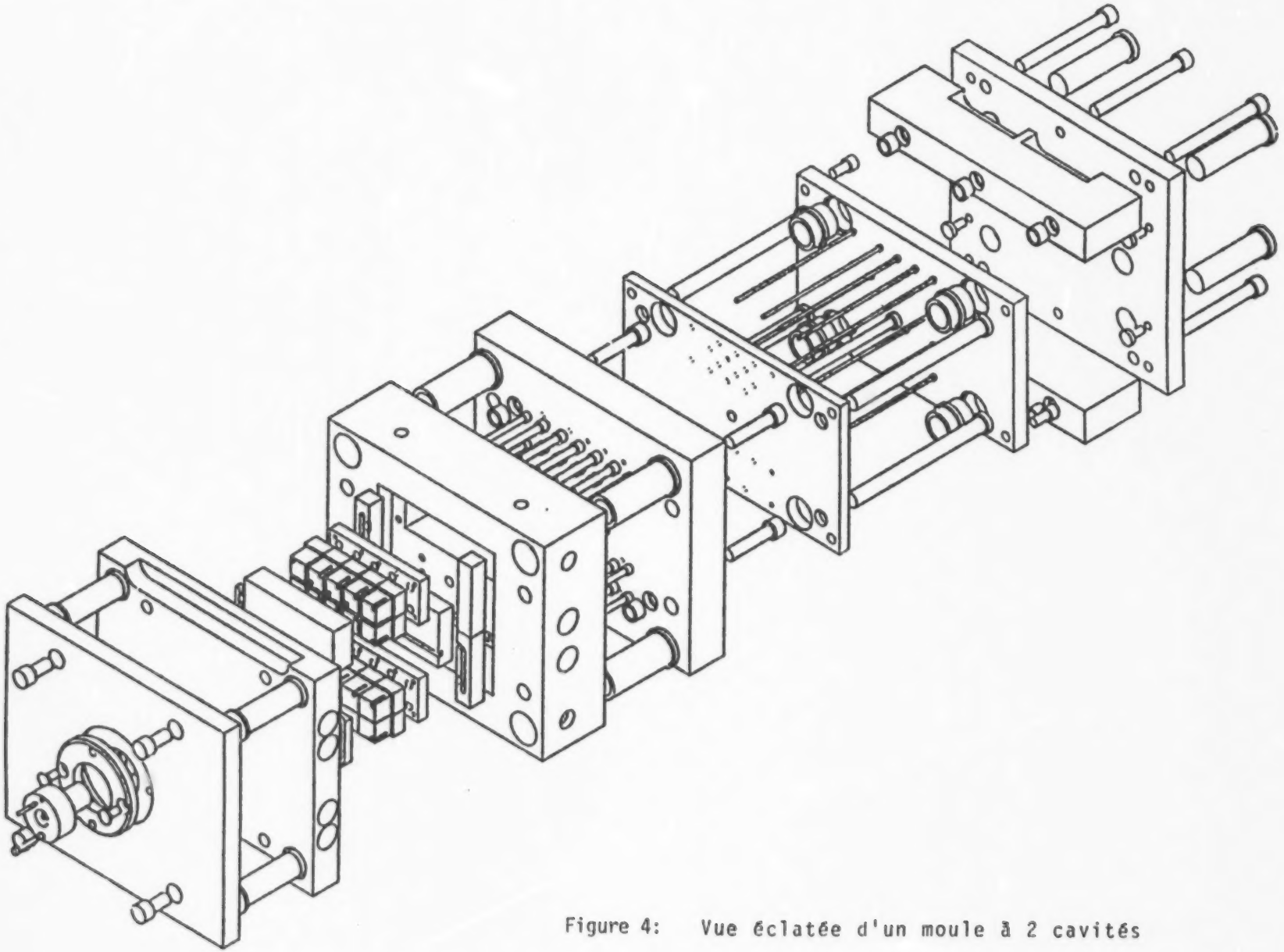


Figure 4: Vue éclatée d'un moule à 2 cavités

Un système expert pour la mise en forme des matériaux

Georges Salloum
Patrick Girard
Paul Raducanu

Introduction

Le passage des méthodes artisanales à l'ingénierie, l'apparition de matériaux, de produits et d'équipements nouveaux, entraînent naturellement de nouvelles techniques de transformation et de mise en marché. Il en est de même pour les applications de l'intelligence artificielle qui s'élargissent de plus en plus, particulièrement au niveau de la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Cette technologie peut être considérée comme étant le développement de systèmes qui présentent certaines caractéristiques associées à notre démarche intellectuelle. Essentiellement, on cherche à imiter le processus de raisonnement de l'être humain, l'apprentissage et la solution des problèmes à l'aide d'un système de logiciels et d'équipements spécialisés.

L'Institut de génie des matériaux s'est fixé comme objectif l'application de ces techniques aux résultats de la recherche dans les domaines du moulage des matières plastiques, des alliages métalliques et du formage des matériaux. Cet article présente les applications de cette technologie aux systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux (SIMM). Il pourrait intéresser les ingénieurs œuvrant dans des secteurs aussi différents que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, l'électronique et l'électroménager.

M. Georges Salloum a une M.SC.A. en génie mécanique. Il est chef de groupe C.D.A.O. à l'Institut de Génie des Matériaux du CNRC. Il dirige les activités en (SIMM) système intégrés mise en forme des matériaux. Il a été à l'emploi d'I.B.M. Canada; il est membre de plusieurs associations professionnelles dont le CASA/SME, S.P.E., S.D.C.E.

M. Patrick Girard, M.SC.A. en génie mécanique, est agent de recherche à l'Institut de Génie des Matériaux du C.N.R.C. Il travaille depuis plusieurs années dans le domaine de la conception et de la fabrication assistées par ordinateur, en particulier sur la simulation du modelage par injection de plastique. Il a publié de nombreux articles sur le sujet. Il est membre de la sécurité des Ingénieurs des plastiques (S.P.E.)

M. Paul Raducanu (B.CC.A.), est à l'emploi de L'Institut de Génie des Matériaux. Il est en charge du système C.S.A.O. et participe au développement des logiciels intégrés pour la mise en forme des matériaux. Il est membre de l'ACII et de l'IEEE.

Systèmes experts et programmes conventionnels

Alors que la programmation conventionnelle utilise des techniques de traitement numérique et des algorithmes pour résoudre les problèmes, l'intelligence artificielle simule les processus intellectuels normalement utilisés par les experts pour atteindre la solution à un problème dans un domaine spécialisé.

Des différences fondamentales existent entre les langages d'intelligence artificielle (LISP, PROLOG) et les langages conventionnels (FORTRAN, BASIC). Les premiers permettent aux ingénieurs, lors du développement, de concentrer leurs efforts sur le résultat désiré et moins sur la façon dont l'ordinateur exécute le programme. Ils sont plus productifs par ligne de code écrite. D'autres outils spécialisés (ART, KEE, S1) fournissent la possibilité d'atteindre une meilleure productivité [1], [2], [3].

Les interactions entre les recherches fondamentales et appliquées préoccupent le groupe de chercheurs de l'Institut en «Systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux». Les thèmes de recherche développés sont largement inspirés des problèmes rencontrés dans l'industrie. Une polarisation de l'intérêt commun de plusieurs entreprises est nécessaire pour la réalisation des systèmes experts, et ce en étroite collaboration avec les universités et les autres laboratoires de recherche.

Cependant, l'application de cette technologie du savoir-faire en ingénierie est une tâche complexe. Il s'agit là d'une constante adaptation et restructuration des travaux de recherche pour simplifier l'accès à l'information, et favoriser le transfert du savoir-faire aux entreprises. Ceci nécessite une connaissance approfondie du procédé pour lequel le système expert est développé. En d'autres termes, l'objectif est de substituer le savoir-faire des experts pendant le cycle de développement d'un produit par une représentation utilisant la symbolique, l'heuristique et un moteur d'inférences de la façon suivante:

— Les symboles peuvent être intégrés dans une structure relationnelle utilisant des lois, des règles et des graphiques. Par exemple, cette structure peut représenter les relations entre des machines, moules, matériaux, pièces et procédés;

— L'heuristique représente les règles de bon jugement et de raisonnement utilisées par l'expert lors de la prise de décision;

— Le moteur d'inférences génère les décisions, cherche les données et synthétise la solution.

Intégration et technologies des bases de données: — Gestions des bases de données — Modélisation des propriétés des polymères, métaux et composites — Règles de conception et limites des conditions d'opération Transformation des matériaux: — Simulation de l'écoulement et du refroidissement — Fabrication du produit et de l'équipement (moule, matrice et filière) Performance du produit et de l'outillage: — Simulation du comportement en service — Optimisation

Tableau 1 Thèmes de recherche sur les systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux

Les composantes principales du SIMM

La simulation d'un processus de production, l'interprétation de celui-ci durant la phase de conception des produits et des outils de production et la transmission des renseignements obtenus à l'équipement de production forment le noyau de ce système expert. Cette démarche englobe les technologies suivantes: la modélisation mathématique, la gestion des bases de données, l'infographie et le contrôle de la production.

Cette simulation complète depuis le cycle de production jusqu'aux conditions d'opération, aidera les utilisateurs potentiels à optimiser la conception et le processus de fabrication des produits et de l'outillage. La figure 1 illustre la création d'un objet avec la technique de modélisation volumique servant de référence pour le système intégré. L'architecture géné-

rique pour la solution des problèmes, étant partie intégrante du système, implique que le processus de prise de décision dépende d'abord de critères d'acceptabilité basés sur les principes d'ingénierie, la science des matériaux, les pratiques de conception appropriées à la fabrication et ensuite de critères de compatibilité avec les décisions antérieures [4]. Tel que montré à la figure 2, l'intégration combine les diverses technologies généralement reliées au procédé de mise en forme (matériaux, outillage, produits et machines). Les différents modules de simulation sont montrés au tableau 2.

Différents modules de simulation

MENU PRINCIPAL

1 = INFORMATION
2 = MATÉRIAUX
3 = TRAITEMENT DE DONNÉES
4 = ÉTUDE RHÉOLOGIQUE
5 = ÉTUDE THERMIQUE
6 = ÉTUDE MÉCANIQUE
7 = ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE
8 = INTERFACES
9 = MODÉLISATION ÉLÉMENTS FINIS
10 = AUTRES
0 = FIN

Tableau 2

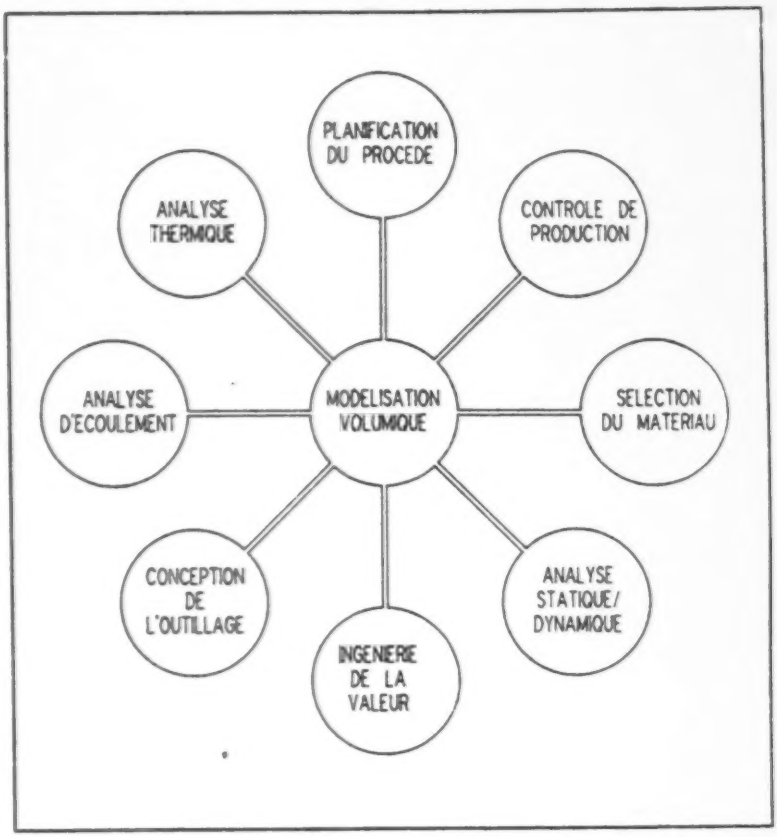


Figure 1 Le processus de développement d'un produit avec un système de fabrication intégre.

Donc les composantes principales du système intégré pour le moulage sont les suivantes:

— *Une interface* (Dialogue) permettant à l'utilisateur d'interroger, et de voir les réponses du système.

— *Un moteur d'inférences* comprenant les procédures d'exécution et de recherche du savoir-faire et des données. Ce moteur est complètement séparé des bases de données.

— *Des bases de données* comprenant les règles, les lois de comportement et toute information pertinente au domaine d'expertise ainsi que leurs interrelations.

— *Un module de développement* servant à l'acquisition et la représentation du savoir-faire permettant l'entrée de données, de règles, de graphiques, et toutes combinaisons de ceux-ci.

— *Des fichiers d'assistance interactive* contenant la description des problèmes et des procédures utilisées pour résoudre ces problèmes.

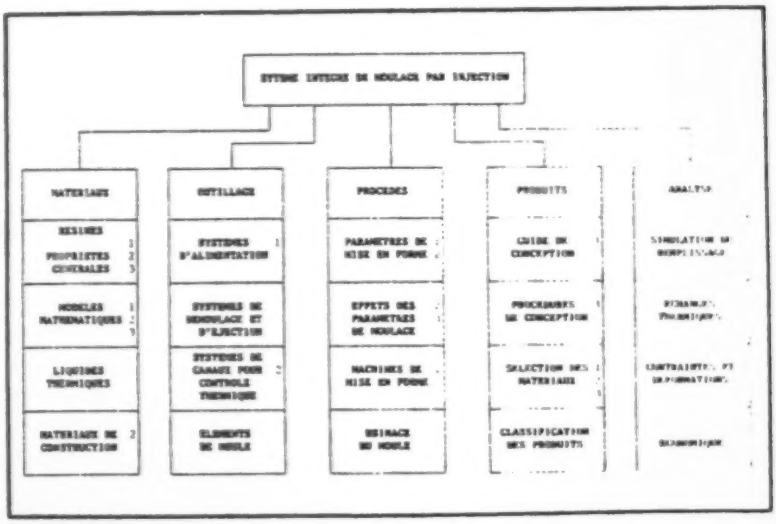


Figure 2

1. **Simulation de remplissage**
2. **Simulation de refroidissement**
3. **Simulation du comportement**

Certains systèmes contiennent des outils de mise au point (déverminage) et d'entretien.

Bases de données intelligentes

Il y a relation logique entre les différentes étapes du processus de développement des produits (définition, choix du matériau, comportement pendant la mise en forme et en service) et leurs bases de données respectives. Les principes de la technologie de groupe ont été utilisés lors du développement de la structure des bases de données sur les matériaux, l'outillage, les procédés et les produits. Les exemples illustrés à la figure 2 montrent la complexité lors du développement d'un tel système.

Ainsi, la modélisation des procédés de mise en forme des matériaux implique la modélisation de leurs propriétés. Les modèles de simulation des procédés ne pouvant pas être plus précis que les données des matériaux sur lesquelles ils sont basés. Les ingénieurs doivent avoir accès non seulement aux meilleures valeurs de ces propriétés mais aussi aux limites d'incertitudes afin de développer des modèles plus fiables, les propriétés des matériaux variant selon certains paramètres (pression, température, temps et morphologie). Diverses équations mathématiques régissant les propriétés thermiques, rhéologiques et mécaniques sont disponibles pour les variables suivantes:

Viscosité dynamique
Densité
Module d'élasticité en flexion
Conductivité thermique
Résistance à la rupture
Retrait au moulage
Diffusivité thermique réelle
Module d'élasticité en tension
Module de cisaillement
Chaleur spécifique
Coefficient de poisson
Diffusivité thermique
Enthalpie spécifique
Nombre de prandt 1

À l'aide de bases de données paramétriques nous pouvons développer les configurations les plus utilisées des systèmes d'alimentation des moules. Celles-ci tiennent comptent des impératifs de conception et de fabrication, des caractéristiques des matériaux et des paramètres de moulage. La figure 3 montre la conception des seuils d'alimentation réalisés à l'aide de menus graphiques interactifs.

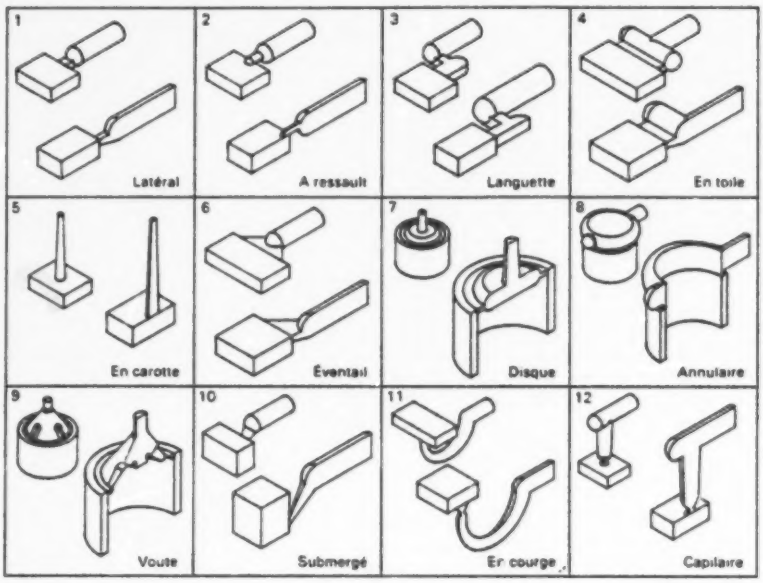


Tableau 3 Choix des seuils d'alimentation du moule

Conception des produits et de l'outillage

À partir d'un concept de base du produit, le concepteur ayant choisi le matériau approprié procède à la simulation de l'objet en suivant les règles de conceptions spécifiques du matériau et du procédé de transformation. À ce stade, le concepteur peut choisir ou dessiner les éléments géométriques de son modèle; soustraire et combiner ces éléments jusqu'à l'obtention d'une représentation volumique réelle de l'objet en question.

Avec les modèles volumiques de la pièce et du système d'alimentation (carotte, canal et seuil) le noyau et l'empreinte seront générés par soustraction dans les plaques du moule. De plus, la modélisation volumique, permet de déterminer la quantité de matière à injecter et à recycler. Ensuite, le coût de production peut être calculé et on peut procéder à la préparation du programme d'usinage du moule par commande numérique. Une planification de la séquence de conception des éléments du moule est essentielle pour prendre avantage des opérateurs des programmes de modélisation volumique. Des économies de temps considérables peuvent être ainsi réalisées pendant la conception. Des recherches sont en cours visant la génération des instructions pour la fabrication du moule pendant le processus de conception de celui-ci. Le design deviendra ainsi un produit dérivé des opérations de fabrication.

Le système aide l'ingénieur à évaluer les effets des conditions de mise en forme sur le produit et le moule tel qu'illustré au tableau suivant:

ANALYSE ET OPTIMISATION DE LA PIÈCE

1 = GÉOMÉTRIE DE LA PIÈCE
2 = PROCÉDÉ DE MOULAGE
3 = CONCEPTION DU MOULE
4 = COMPORTEMENT DU MATÉRIAU
5 = CONDITIONS DE SERVICE
6 = PROCÉDURE DE MODÉLISATION AR ÉLÉMENTS FINIS
7 = INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS
8 = AIDE
0 = RETOUR EN ARRIÈRE

et à la figure 6. Ensuite, l'analyse structurale peut être réalisée en

utilisant des propriétés mécaniques locales. Un modèle d'éléments finis sera préparé qui donnera des résultats plus fiables et plus réalistes.

Le type et la durée des sollicitations, l'intervalle de température et d'autres contraintes en service doivent être analysées. Une application de cette nouvelle méthodologie d'optimisation est présentée aux figures 4 et 5. Le processus est impératif dans le cas de pièces de grandes dimensions ou en matériaux composites.

Simulation des procédés de transformation

La simulation, pierre angulaire de l'automatisation sans risque, permet d'éviter des erreurs coûteuses lors du cycle de développement d'un produit. Ainsi, une simulation de procédé permet d'analyser le comportement du matériau sous différentes conditions d'opération. Les résultats permettent également d'optimiser la conception de produits et de l'outillage, de raccourcir le cycle de production et de réduire la consommation d'énergie. Ces simulations ne s'appliquent évidemment qu'aux problèmes suffisamment maîtrisés pour être décrits dans un système expert.

Analyse de l'écoulement

Le processus commencé par la description géométrique de la pièce et du système d'alimentation, se poursuit par l'analyse du remplissage du moule, la représentation des fronts d'écoulement de la matière et l'équilibrage des canaux d'alimentation. Le système assiste l'utilisateur dans le choix des paramètres de l'injection et alerte celui-ci lorsque les conditions limites du matériau sont exédées pendant la simulation.

L'analyse établit les variations des pertes de pression, de contraintes de cisaillement et de la température le long d'un trajet d'écoulement.

Analyse du refroidissement

D'autres programmes d'analyse étudient le transfert de chaleur entre la pièce et le moule durant la solidification, l'objectif est d'améliorer la conception du système de refroidissement et d'optimiser les paramètres d'opération (temps de refroidissement, débit et température du liquide caloporteur). Ceci est illustré aux figures 6 et 7 pour le calcul des circuits de refroidissement.

Le système comprend un module d'assistance aux concepteurs de moules et aux transformateurs afin de prédire le retrait local ou cumulatif à partir des résultats de l'analyse du remplissage et du refroidissement.

La prédiction du retrait est une étape majeure pendant la conception des moules car des erreurs à ce stade peuvent entraîner des pertes d'argent et de temps considérables. La compensation du retrait implique un ajustement des dimensions de la pièce pendant l'usinage du moule.

Contrôle de la production

Le tableau suivant montre aussi que le système donne entre

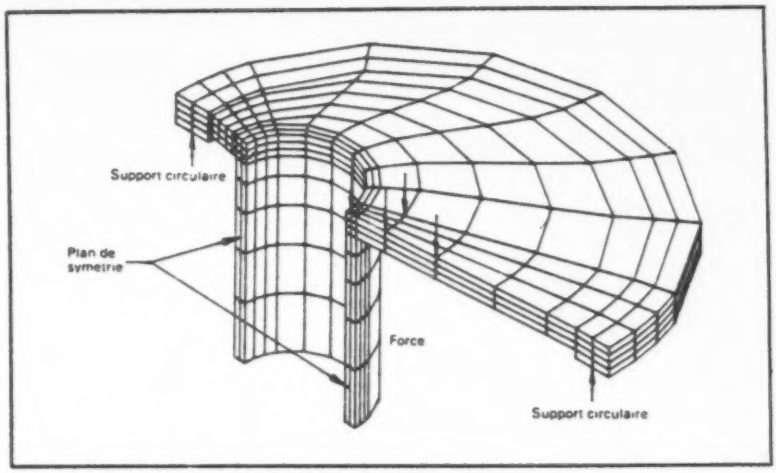


Figure 4 Modélisation par éléments finis d'une pièce

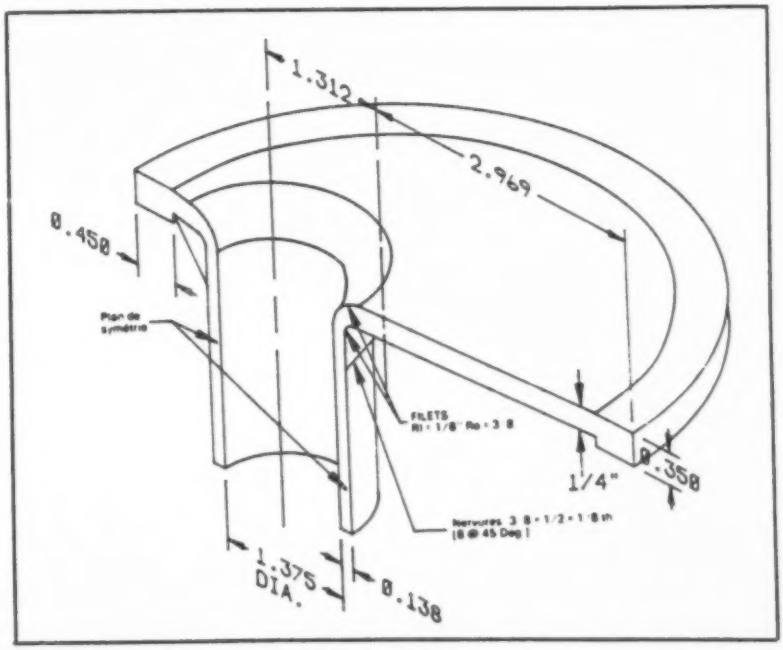


Figure 5 Représentation de la pièce optimisée

autres les conditions limites d'opération, les caractéristiques de la matière fondue, la température du moule, la vitesse et la pression d'injection. Celles-ci sont alors communiqués aux équipements de transformation.

Température de séchage; température d'injection minimum; température du fourneau arrière; température du fourneau avant; température minimum du moule; vitesse de rotation de la vis; pression de remplissage maximum; taux de cisaillement maximum; température de non écoulement; pression de maintien maximum; temps de séchage; température d'injection maximum; température du fourneau central; température de la buse; température maximum du moule; pression de remplissage minimum; temps de remplissage; contrainte de cisaillement maximum; pression de maintien minimum; contre-pression sur la vis.

Cette technologie moderne est basée sur l'analyse des effets des paramètres captés en temps réel et transmis à l'unité de contrôle en boucle fermée. Le tableau suivant montre un diagnostic des symptômes possibles qui peut être réalisé lors de la simulation en fonction des paramètres de

Problèmes et solutions suggérées

Lignes de soudure et d'écoulement

Augmenter la température de la matière; augmenter la pression d'injection; augmenter la vitesse d'injection; augmenter le temps de maintien; augmenter la température du moule.

Retassures

Diminuer la température de la matière; augmenter la pression d'injection; diminuer la température du moule.

Queues de comètes

Vérifier la température de la matière; diminuer la vitesse d'injection; augmenter la température du moule; vérifier la position des seuils.

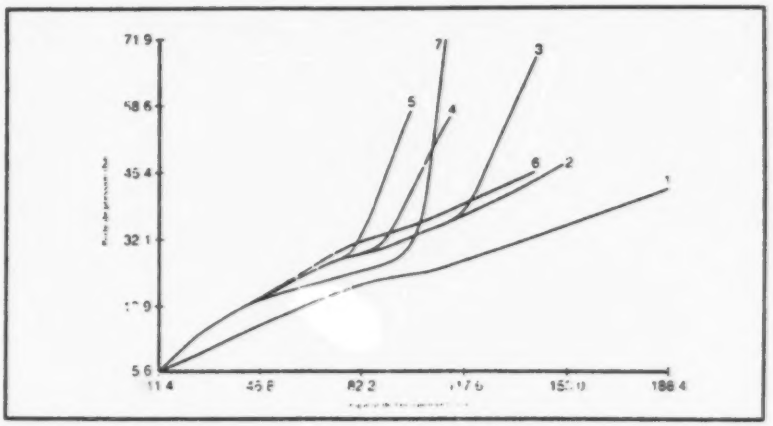


Figure 6 Variation des pertes de pression pour différents chemins d'écoulement

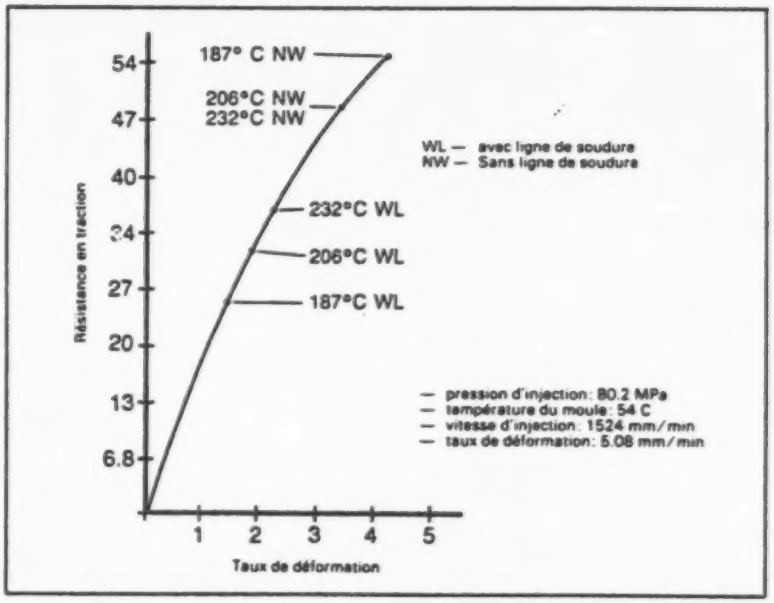


Figure 7 Effets de la température de la matière sur la résistance mécanique du plastique

production. Donc des corrections peuvent être apportées en analysant les causes et les alternatives de solutions proposées par le système lors de la conception de la pièce et du moule.

L'utilisateur peut choisir des valeurs initiales pour l'analyse ou vérifier si les résultats s'inscrivent dans les limites recommandées. En mode automatique (Optionnel) le système peut réaliser ce travail d'optimisation. On peut alors procéder au dessin final du moule. Les programmes étant interactifs, l'étape de simulation du procédé prend fin lorsque les conditions d'opération optimales sont atteintes.

Conclusion

Les techniques des systèmes experts ioncorporées dans SIMM ont permis de mettre à la disposition des ingénieurs un outil de simulation qui permet d'utilier l'informatique, le savoir-faire et l'expertise à travers le cycle du développement des produits et de leur outillage, de la conception à la fabrication.

Le succès du SIMM est basé sur l'existence de la nécessité de

résoudre rapidement les problèmes moulage; les règles utilisées sont universellement reconnues par les experts de l'industrie; les diverses variables impliquées lors de la prise de décision peuvent être quantifiées ou codifiées et la modularité du système facilite la distinction et la synthèse des variables ainsi que leur interrelations avec les moteurs d'inférences correspondants.

Références

1 HAYES, R.F.; WATERMAN, D. A.; LENAT, D. B., «Building expert systems», Addison-Wesley Publishing Co; 1983.

2 DIXON, J.R.; SIMMONS, M.K.; «Computers that Design: Expert Systems for Mechanical Engineers», Computers in Mechanical Engineering, November 1983; pp. 10-18.

3 MILLER, R.K.; «Artificial intelligence: A New Tool for Manufacturing»; Manufacturing Engineering, April 1985, pp. 56-65.

4 SALLOUM, G.; «Expert and Computer Integrated Injection Moulding»; 34th Canadian Chemical Engineering Conference, October 1984, pp. 194-197.